

Resumen

Este proyecto recoge todo el trabajo realizado durante la temporada 2012-2013 dentro del equipo ETSEIB Motorsport en el contexto del diseño del CAT06e. Pretende ser un documento donde engloba todo el proceso de diseño y fabricación de una llanta de fibra de carbono para un monoplaça de la Formula Student de manera que sea de la máxima utilidad para los equipos de los años siguientes.

Este proyecto pone énfasis en el diseño y factibilidad de los modelos y moldes necesarios para la fabricación de la llanta, permitiendo que la fabricación del conjunto modelos, moldes y pieza sean los más económico y sencillo posibles. Por otra parte este proyecto no pretende hacer un estudio exhaustivo de las fuerzas que actúan sobre el monoplaça ya que varios compañeros dentro del equipo ya han realizado sus proyectos profundizando en la dinámica del vehículo.

El proyecto en sí se centra en el estudio de los materiales compuestos y sus distintos procesos de fabricación.

Se hace un estudio de elementos finitos con el programa Abaqus para dimensionar el número de capas necesario para soportar las solicitaciones mecánicas necesarias.

Se detalla paso por paso el proceso de fabricación de los moldes por el método de infusión de resina. Una técnica de laminación de fibras que no se había utilizado hasta el momento dentro del equipo del ETSEIB Motorsport y se pretende que sea una guía para que los próximos componentes del equipo puedan utilizar.

Por otra parte también se detalla el proceso de fabricación de la llanta final por la laminación en fibras de carbono pre-impregnadas. Técnica más utilizada para la laminación de piezas con altas solicitaciones mecánicas.

La aportación de este proyecto al equipo ETSEIB Motorsport de la universidad ha resultado ser la fabricación de unos moldes y un prototipo de llanta de fibra de carbono que servirán de base como vía de estudio en la mejora de la dinámica del monoplaça CAT07e.

Sumario

RESUMEN	1
SUMARIO	3
Sumario de imágenes.....	5
Sumario de figuras	7
Sumario de tablas.....	7
GLOSARIO	8
1. PREFACIO	9
2. INTRODUCCIÓN	10
2.1. Justificación del proyecto	10
2.2. Objetivos del proyecto.....	10
2.3. Alcance del proyecto.....	11
3. ESTADO DEL ARTE	12
3.1. Características de un monoplaza de la Formula Student.....	12
3.2. Características de una llanta.....	12
3.3. Llantas de los monoplazas anteriores	15
4. ESTUDIO DINÁMICO	17
4.1. Masa suspendida y masa no suspendida	17
4.2. Influencia de la masa no suspendida en la dinámica del vehículo.....	18
5. ESTUDIO DE ALTERNATIVAS	22
5.1. Estudio de las funciones	23
5.2. Análisis de los resultados.....	26
5.3. Selección del material y el proceso de fabricación.....	26
6. PLANIFICACIÓN Y DESARROLLO DEL PROYECTO	31
6.1. Tiempo de ejecución	31
6.2. Fases del proyecto.....	31
7. DISEÑO Y SIMULACIONES	34
7.1. Restricciones en el diseño	34
7.1.1. Compatibilidad	34
7.1.2. Interacción con otros componentes.....	35

7.1.3.	Factibilidad de fabricación y diseño de moldes y modelos	36
7.2.	Simulaciones estructurales.....	42
7.2.1.	Cálculo de fuerzas	44
7.2.2.	Hipótesis de cálculo	45
7.2.3.	Caracterización de los materiales.....	45
7.2.4.	Condiciones de contorno	49
7.2.5.	Resultados.....	50
8.	FABRICACIÓN DE LOS MOLDES	53
8.1.	Preparación de los modelos	53
8.2.	Proceso de laminado de los moldes	56
8.2.1.	Fases de laminación de los moldes.....	57
8.2.2.	Laminación del primer molde.....	60
8.2.3.	Laminación del segundo molde	72
9.	LAMINACIÓN Y CURADO DE LA PIEZA FINAL	75
9.1.	Preparación de los moldes	75
9.2.	Procedimiento de laminado	76
9.3.	El curado.....	82
9.4.	Acabados finales	84
10.	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL	87
10.1.	Interacción con el medio ambiente.....	87
10.2.	Acciones de protección al laminar y a la manipulación del producto final: .	88
10.3.	Sistema de reciclaje de materiales compuestos	88
11.	PRESUPUESTO DEL PROYECTO	90
	CONCLUSIONES	93
	AGRADECIMIENTOS	96
	BIBLIOGRAFÍA	99
	Referencias bibliográficas	99
	Bibliografía complementaria	99

Sumario de imágenes

<i>Imagen 1.1. Trofeos conseguidos por el equipo ETSEIB Motorsport</i>	<i>9</i>
<i>Imagen 3.1. Detalle de las partes de una llanta.....</i>	<i>13</i>
<i>Imagen 3.2. Ilustración de un offset cero, un offset positivo y uno negativo</i>	<i>13</i>
<i>Imagen 3.3. Detalle de la definición de hump</i>	<i>14</i>
<i>Imagen 3.4. De izquierda a derecha: llanta de una pieza, llanta de dos piezas y llanta de tres piezas.</i>	<i>15</i>
<i>Imagen 3.5. A la izquierda la llanta Braid utilizada en los CAT01 y 02. A la derecha la llanta OZ Racing utilizada en el CAT03, 04 y 05.</i>	<i>16</i>
<i>Imagen 4.1. Representación gráfica de del modelo matemático de un cuarto de vehículo de un grado de libertad</i>	<i>17</i>
<i>Imagen 4.2. Representación gráfica de del modelo matemático de un cuarto de vehículo de un grado de libertad</i>	<i>18</i>
<i>Imagen 4.3. Comportamiento de llantas de diferentes materiales en frente de una irregularidad del terreno ...</i>	<i>20</i>
<i>Imagen 5.1. Esquema de los tejidos plain weave, satin weave y twill weave</i>	<i>28</i>
<i>Imagen 5.2. Imagen de tipos de tejidos Twill, Plain y UD.....</i>	<i>28</i>
<i>Imagen 5.3. Lámina casi-isotrópica</i>	<i>29</i>
<i>Imagen 5.4. Lámina unidireccional.....</i>	<i>29</i>
<i>Imagen 5.5. Proceso de infusión de un molde.....</i>	<i>30</i>
<i>Imagen 7.1. De arriba a abajo: render del modelo principal, render del modelo auxiliar y render del modelo central.....</i>	<i>37</i>
<i>Imagen 7.2. Conjunto de los modelos y su ensamblaje.....</i>	<i>38</i>
<i>Imagen 7.3. Render de la llanta con el detalle de la línea de partición de los dos moldes</i>	<i>39</i>
<i>Imagen 7.4. Render del conjunto de moldes</i>	<i>39</i>
<i>Imagen 7.5. Ensamblaje de los tres moldes.....</i>	<i>40</i>
<i>Imagen 7.6. Explicación de un molde interior y un molde exterior.....</i>	<i>40</i>
<i>Imagen 7.7. Ángulos de salida positivos y negativos</i>	<i>41</i>
<i>Imagen 7.8. Detalle de las dimensiones de los agujeros de los radios.....</i>	<i>42</i>
<i>Imagen 7.9. Imagen del programa ANSA con el mallado de la llanta</i>	<i>43</i>
<i>Imagen 7.10. Vista horizontal y vertical del CAT06e</i>	<i>45</i>
<i>Imagen 7.11. Número de capas y su orientación en un radio.....</i>	<i>47</i>
<i>Imagen 7.12. Distribución de capas de la cara exterior de la llanta</i>	<i>48</i>
<i>Imagen 7.13. Distribución de capas de la cara interior y lateral de la llanta</i>	<i>48</i>
<i>Imagen 7.14. Condiciones de contorno: Restricción de movimientos.....</i>	<i>49</i>
<i>Imagen 7.15. Condiciones de contorno: Fuerzas</i>	<i>49</i>
<i>Imagen 7.16. Desplazamiento de la primera iteración</i>	<i>51</i>
<i>Imagen 7.17. Desplazamientos en la llanta.....</i>	<i>51</i>
<i>Imagen 7.18. Detalle de los desplazamientos</i>	<i>52</i>
<i>Imagen 7.19. Tensiones en la llanta</i>	<i>52</i>
<i>Imagen 8.1. Molde auxiliar</i>	<i>53</i>
<i>Imagen 8.2. Molde principal</i>	<i>53</i>

<i>Imagen 8.3. Molde auxiliar con el adhesivo bicomponente de AXON.....</i>	<i>54</i>
<i>Imagen 8.4. Detalle del molde auxiliar con el adhesivo bicomponente de AXON.....</i>	<i>54</i>
<i>Imagen 8.5. Vista inferior de los tres modelos ensamblados</i>	<i>55</i>
<i>Imagen 8.6. Detalle de los modelos ensamblados con el adhesivo bicomponente</i>	<i>55</i>
<i>Imagen 8.7. Modelos ensamblados y asegurados con mordazas</i>	<i>56</i>
<i>Imagen 8.8. Render de la laminación del molde inferior</i>	<i>57</i>
<i>Imagen 8.9. Render de la extracción del modelo auxiliar para la laminación del molde superior</i>	<i>58</i>
<i>Imagen 8.10. Render de la laminación del molde superior.....</i>	<i>58</i>
<i>Imagen 8.11. Conjunto de moldes finalizados</i>	<i>59</i>
<i>Imagen 8.12. Moldes ensamblados.....</i>	<i>59</i>
<i>Imagen 8.13. Secado del gel coat del molde inferior a temperatura ambiente.....</i>	<i>60</i>
<i>Imagen 8.14. Laminación de las primeras capes de fibra de carbono del molde inferior.....</i>	<i>61</i>
<i>Imagen 8.15. Laminación de las capes fibras de carbono de gramaje de 600 g/m².....</i>	<i>62</i>
<i>Imagen 8.16. Colocación del film sangrador</i>	<i>63</i>
<i>Imagen 8.17. Colocación de la malla de distribución.....</i>	<i>63</i>
<i>Imagen 8.18. Zona sin malla de distribución para el Frenado de la resina</i>	<i>64</i>
<i>Imagen 8.19. Distribución de líneas de aspiración.....</i>	<i>65</i>
<i>Imagen 8.20. Detalle de la 'T' colocada dentro del tubo de aspiración</i>	<i>66</i>
<i>Imagen 8.21. Detalle de la 'L' en una esquina del molde de unión entre dos tubos de aspiración</i>	<i>66</i>
<i>Imagen 8.22. Colocación de la malla de distribución encima del tubo de aspiración.....</i>	<i>66</i>
<i>Imagen 8.23. Detalle de las tiras de núcleo para infusión</i>	<i>67</i>
<i>Imagen 8.24. Trampa de vacío fabricada por el equipo ETSEIB Motorsport.....</i>	<i>68</i>
<i>Imagen 8.25. Detalle de la toma de entrada de resina en el molde.....</i>	<i>69</i>
<i>Imagen 8.26. Detalle del cierre del tubo de aspiración mediante una 'Z'</i>	<i>69</i>
<i>Imagen 8.27. Detalle de la toma para poder mantener el vacío dentro del horno.....</i>	<i>70</i>
<i>Imagen 8.28. Detalle de la separación de la bolsa de vacío y el molde inferior después de la infusión.....</i>	<i>71</i>
<i>Imagen 8.29. Detalle del molde inferior después de ser separado del modelo.....</i>	<i>72</i>
<i>Imagen 8.30. Laminado de la primera capa de fibra de carbono de gramaje 200 g/m²</i>	<i>72</i>
<i>Imagen 8.31. Molde superior después de la extracción de la bolsa de vacío.....</i>	<i>73</i>
<i>Imagen 8.32. Detalle de la colocación de los tornillos y pasadores de sujeción en los moldes</i>	<i>74</i>
<i>Imagen 9.1. Detalle del monolítico de fibra de carbono de la parte central.....</i>	<i>76</i>
<i>Imagen 9.2. Detalle de los diferentes patrones del molde superior</i>	<i>77</i>
<i>Imagen 9.3. Detalle de los patrones del molde inferior y central</i>	<i>77</i>
<i>Imagen 9.4. Distribución de los patrones correspondientes a diferentes capas</i>	<i>78</i>
<i>Imagen 9.5. Laminación con prepreg de la cara superior de la llanta en las instalaciones de NEXUS Projectes..</i>	<i>78</i>
<i>Imagen 9.6. Colocación del film sangrador encima de la primera capa de la cara inferior de la llanta para hacer la primera compactación</i>	<i>79</i>
<i>Imagen 9.7. Colocación de la bolsa de vacío entre los radios de la cara inferior para poder juntar las dos cara de la llanta.....</i>	<i>80</i>
<i>Imagen 9.8. Ensamblaje de los moldes y colocación del peel play.....</i>	<i>81</i>
<i>Imagen 9.9. Vacío completado sobre el molde antes de introducirlo en el horno autoclave.....</i>	<i>81</i>

<i>Imagen 9.10. Autoclave en las instalaciones de NEXUS Projectes durante la extracción del monocasco de fibra de carbono del CAT06e.....</i>	<i>82</i>
<i>Imagen 9.11. Llanta recién separada de los moldes</i>	<i>84</i>
<i>Imagen 9.12. Detalle del peso de la llanta (1680 kg) después del desmoldeo</i>	<i>84</i>
<i>Imagen 9.13. Detalle de la tapa de los agujeros de los radios.....</i>	<i>85</i>
<i>Imagen 9.14. Detalle de los adhesivos de las tapas de los agujeros de los radios</i>	<i>86</i>
<i>Imagen 9.15. Detalle de la válvula de hinchado colocada en la llanta.....</i>	<i>86</i>

Sumario de figuras

<i>Fig. 4.1. Comparación de la respuesta frecuencial de una llanta de aluminio y una llanta de fibra de carbono</i>	<i>21</i>
<i>Fig. 7.1. Grafico fuerza desplazamiento de los neumáticos en función de la presión</i>	<i>46</i>
<i>Fig. 9.1. Gráfico del ciclo de temperatura, presión y vacío durante el curado de la llanta en el horno autoclave</i>	<i>83</i>

Sumario de tablas

<i>Tabla 5.1. Matriz de estudio de funciones de alternativas diferentes diámetros</i>	<i>22</i>
<i>Tabla 5.2. Matriz de estudio de funciones de alternativas diferentes diseños</i>	<i>23</i>
<i>Tabla 5.3. Comparación de las propiedades de los Tejidos de fibra de carbono</i>	<i>29</i>
<i>Tabla 6.1. Fases del proyecto y su duración</i>	<i>33</i>
<i>Tabla 7.1. Parámetros geométricos y de masa del CAT06e</i>	<i>44</i>
<i>Tabla 7.2. Distribución de capes y su orientación</i>	<i>50</i>
<i>Tabla 11.1 Coste total del proyecto</i>	<i>90</i>
<i>Tabla 11.2 Ingresos del proyecto</i>	<i>91</i>
<i>Tabla 11.3 Balance del proyecto</i>	<i>91</i>
<i>Tabla 11.4 Precio de una llanta desglosado</i>	<i>92</i>
<i>Tabla 11.5 Precio de una llanta desglosado</i>	<i>92</i>

Glosario

Agente desmoldeante: Permite la liberación del componente pre-impregnado ya curado del molde.

CAD: Diseño Asistido por Ordenador “*Computer Aided Design*”.

Film sangrador: Por lo general hechas de fieltro o tela de vidrio y absorbe el exceso de resina. El flujo de la resina puede ser regulada por la cantidad film introducido.

FS: *Formula Student*.

Gel coat: es la primera capa de resina que protege al laminado del ataque químico y medioambiental. Es la primera capa que se aplica sobre el molde y, una vez la pieza es extraída, constituye la superficie que estará en contacto con el exterior, actuando como barrera de desgaste de la misma.

k1: Constante del neumático.

k2: Constante elástica del amortiguador.

m1: Masa no suspendida

m2: Masa suspendida

Peel play: Permite el libre paso del exceso de resina durante el curado. Se puede quitar fácilmente después del curado para proporcionar una superficie adherente o una superficie lista para ser pintada.

Prepreg: Fibras pre-impregnadas

SAE: *Society of Automotive Engineers* o sociedad de ingenieros del automóvil.

Tacky tape: Cinta selladora de alta elasticidad. Se usa para evitar la evacuación del aire y formar el vacío de la bolsa en un molde.

x₁: Desplazamiento de la masa no suspendida.

\ddot{x}_1 : Aceleración de la masa no suspendida.

x₂: Desplazamiento de la masa suspendida.

\ddot{x}_2 : Aceleración de la masa suspendida.

ω_0 : Frecuencia natural de amortiguamiento.

1. Prefacio

Este proyecto se encuentra dentro del marco de la Formula Student más en concreto en la temporada 2012-2013 con la fabricación del CAT06e, una evolución del CAT05e. De esta manera se diseña el segundo monoplaça totalmente eléctrico del equipo. El número de miembros del equipo creció hasta las 35 personas, equiparándose a los equipos punteros de Europa.

El equipo ETSEIB Motorsport es el sexto año que participa en este proyecto. Esta iniciativa empezó en el año 2006 dentro de la *Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona* con la colaboración de la empresa SUNRED. Este proyecto ha tenido gran éxito, así lo demuestra con la participación del equipo año tras año de manera ininterrumpida en las distintas competiciones alrededor de Europa.

El CAT06e destacó por ser el primer monoplaça del equipo que rodó el mismo día de su presentación, por sus buenos resultados en las distintas competiciones con el primer puesto en la prueba del *Cost* en la *Formula Student Germany*, por un tercero y un primer puesto en el *Cost* y el *Efficiency* respectivamente y un TOP 10 en el resultado final de la *Formula Student Spain*.

De esta manera el equipo consiguió consagrarse como uno de los mejores equipos de Europa en la prueba del *Cost* y ser el primer equipo Español en conseguir un primer puesto en la *Formula Student Germany*.



Imagen 1.1. Trofeos conseguidos por el equipo ETSEIB Motorsport

2. Introducción

2.1. Justificación del proyecto

Los años anteriores los monoplazas del ETSEIB Motorsport utilizaban unas llantas comerciales destinadas a todo tipo de vehículos del mundo de la competición. El CAT01 y 02 utilizaban llantas de la marca Braid y a partir del CAT03 se utilizaron unas llantas comerciales de la marca OZ Racing. El hecho de utilizar unas llantas comerciales para todo tipo de vehículos de competición es que este tipo de llantas están sobredimensionadas para las características de los monoplazas y la competición en general de la *FS*.

Actualmente no existen unas llantas comerciales destinadas para monoplazas con unas características tan especiales y con una competición única. Los monoplazas de la *FS* debido a la filosofía de las pruebas son monoplazas que se encuentran por debajo de los 300kg. No han de competir en pista con otros monoplazas evitando así posibles contactos o golpes con otros monoplazas. Las pruebas se hacen sobre circuitos de asfalto sin muchas irregularidades del terreno ni la posibilidad de pasar por encima de pianos. Las velocidades máximas a las que se pueden llegar no sobrepasan los 130km/h.

Por lo tanto aprovechando que la competición de la *FS* es una competición de diseño se decide diseñar unas llantas única y exclusivamente para el CAT06e. Dotando a las llantas con unas características mejor dimensionadas para dichos monoplazas.

2.2. Objetivos del proyecto

Las llantas son fundamentales para cualquier vehículo, ya que es el único componente del vehículo juntamente con el neumático que está en contacto con el asfalto del circuito. Debido a las propias características de los monoplazas de esta categoría, las llantas tienen una influencia muy importante sobre la dinámica de los monoplazas de la *FS*.

Por otro lado el conjunto rueda no solo influye a lo que es el monoplaza en sí. En las ruedas delanteras que son direccionales, a altas velocidades aparece el efecto giroscópico influyendo en la fuerza necesaria para girar el volante. Corrigiendo este efecto el piloto no tendría que hacer tanto esfuerzo mejorando las condiciones de pilotaje muy importantes en la alta competición.

Este proyecto se centra en diseñar y fabricar unas llantas para el monoplaza CAT06e del equipo ETSEIB Motorsport que competirá en las competiciones de Alemania, España e Italia de la *Formula Student*.

El objetivo de este proyecto se encuentra ubicado dentro de un proyecto de mayor envergadura que es diseñar, fabricar y competir en el marco de la Formula Student con el monoplaza CAT06e.

Debido a la corta durada del proyecto y la importancia de conseguir finalizar el monoplaza para poder competir, la finalización de las cuatro llantas pasa a un segundo objetivo, siendo el objetivo principal del proyecto la construcción de un prototipo de llanta que reúna las características siguientes:

- Minimizar el peso del subsistema rueda.
- Ha de ser compatible con las llantas de la marca OZ Racing.
- No interferir con los subsistemas vecinos como el sistema de frenos.
- Que cumpla con la normativa vigente de la *Formula Student*
- Adaptarse a los neumáticos utilizados.

Por otro lado el proyecto tiene unos objetivos generales que son:

- Introducción del uso de la fibra de carbono en el mercado de las llantas.
- Profundizar en el conocimiento sobre los materiales compuestos y sus procesos de fabricación dentro del equipo ETSEIB Motorsport.

2.3. Alcance del proyecto

El alcance del proyecto se centra en todo el trabajo realizado durante la temporada 2012/2013 durante el diseño y construcción del CAT06e.

En relación a la herramienta de dibujo informático y diseño CAD se ha utilizado el programa Solid Works 2011. Para las simulaciones de materiales compuestos se ha utilizado el programa Abaqus. Para el mallado de la pieza se ha utilizado pre-procesador ANSA de BETA CAE Systems.

En este proyecto se describe el proceso de diseño y fabricación tanto de la llanta como de los moldes necesarios para su fabricación.

3. Estado del Arte

3.1. Características de un monoplaza de la Formula Student.

Los monoplazas de la *FS* están diseñados bajo una normativa muy amplia. Este hecho hace que cada año se vean soluciones muy diferentes a problemas muy parecidos. La utilización de tecnologías muy distintas y muchos frentes de innovación, que después puede ser utilizada tanto en la industria del automóvil como hasta competiciones automovilísticas de alto nivel como la Formula 1.

Los puntos donde la normativa es realmente restrictiva son en aquellos aspectos relacionados con la seguridad. Al fin y al cabo son los estudiantes son los encargados tanto de diseñar, construir como de pilotar.

Las pruebas dinámicas se hacen en circuitos delimitados por conos. Los circuitos son muy revirados para evaluar la maniobrabilidad de los monoplazas.

Las características de las pruebas dinámicas hace que los monoplazas tiendan ser lo más ligeros posibles (no existe peso mínimo). Hay equipos como el de la universidad de Delft que han llegado a construir un monoplaza con un peso alrededor de los 140 kg.

3.2. Características de una llanta

Una llanta es normalmente la pieza metálica donde se asienta el neumático y que lo mantiene unido al eje de la rueda.

Las características de una llanta son:

- **Diámetro efectivo:** es la distancia entre los asientos del talón del neumático y el centro del eje de rodadura, medido en el plano de los radios.
- **Ancho efectivo:** es la distancia de separación entre los bordes opuestos de las pestañas. La anchura de pestaña a pestaña de la llanta debe ser de un mínimo de tres cuartas partes de la anchura de la sección del neumático. Y la anchura máxima de la llanta debe ser igual a la anchura de la banda de rodadura del neumático.

- **ET u Offset:** del alemán "*Einpresstiefe*" u "*Offset*" en Inglés, indica la distancia desde la superficie de montaje de la llanta a la línea central de la rueda. El desplazamiento puede ser uno de los tres tipos siguientes:

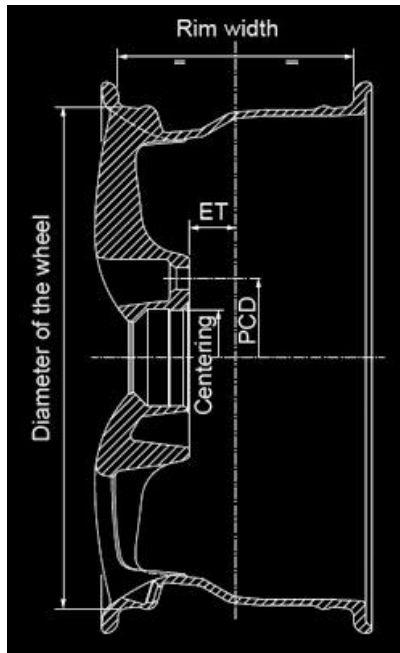


Imagen 3.1. Detalle de las partes de una llanta

- **Offset de cero:** La superficie de montaje de la llanta está alineado con la línea central de la rueda.
- **Offset positivo:** La superficie de montaje de la llanta está situada hacia la parte frontal o exterior de la rueda.
- **Offset negativo:** La superficie de montaje de la llanta está situada hacia la parte posterior de la llanta o parte interior donde encontramos el freno.

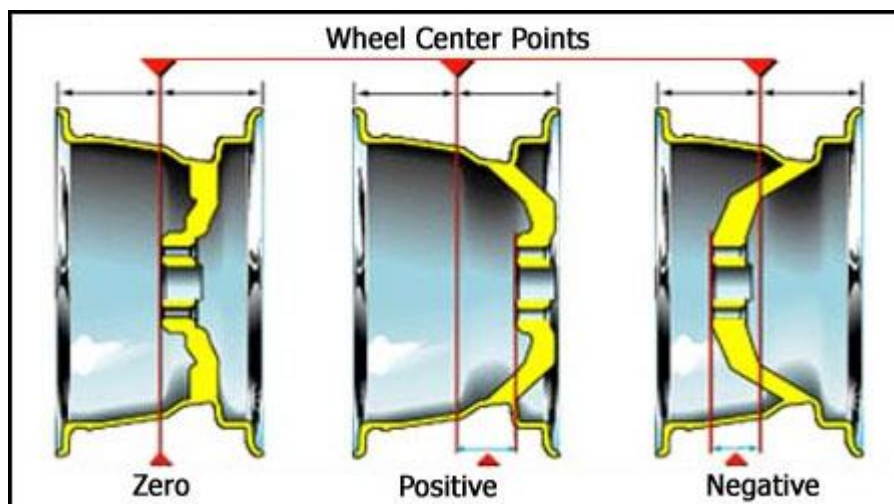


Imagen 3.2. Ilustración de un offset cero, un offset positivo y uno negativo

Hump: Es la joroba que impide que el neumático se deslice alrededor de la rueda, evitando de este modo una pérdida repentina de la presión de los neumáticos.

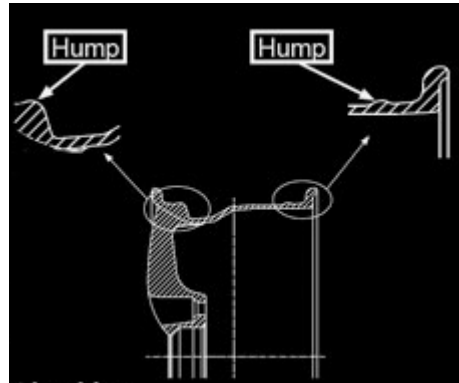


Imagen 3.3. Detalle de la definición de hump

- **PCD:** del Inglés "*Pitch Circle Diameter*", que indica el diámetro del círculo que conecta el centro de los agujeros de fijación
- **N ° de taladros:** El número de agujeros en la rueda necesaria para fijarlo al coche. Aparece junto con el PCD.
- **Centrado:** también llamado "*Center Bore*" (CB), indica el diámetro del agujero central donde se asienta el buje del coche.
- **Tipo:** depende del tipo de vehículo y del neumático. Existen llantas con diferentes tipos de perfiles del borde y llantas compuestas por un número diferente de piezas.
- **Prestaciones del vehículo:** Debido a que la llanta es donde reside el neumático de la rueda y la llanta soporta la forma del neumático, las dimensiones de las llantas son un factor importante en las características dinámicas de un automóvil.

Las llantas es una de las partes de los vehículos que se encuentran expuestas hacia el exterior del vehículo y por lo que es de los primeros componentes que sufre golpes con todo lo que rodea al vehículo, piedras, bordillos, otros coches, etc... Por esto las llantas están fabricadas básicamente en 3 materiales, acero, aleación de aluminio y magnesio. Las

llantas de acero y aleación de aluminio son utilizadas para vehículos de calle. Las de magnesio debido a su buena relación peso resistencia mecánica son utilizadas básicamente en vehículos y monoplazas de competición. Los métodos de fabricación de las llantas de competición en estos materiales esta explicado en el anexo E. De esta manera casi ningún fabricante se atreve a fabricar llantas de fibra de carbono debido a su fragilidad.

Pero este aspecto negativo en el mundo de la competición y en particular de la *FS* no existe. Por lo que se están empezando a desarrollar distintos tipos de llantas en este material.

Para acabar se pueden diferenciar distintos tipos de llantas en relación al número de piezas que lo forman. Por lo que podemos encontrar llantas de una sola pieza, llantas de dos piezas (los radios por un lado y la parte central por otro) e incluso llantas de tres piezas (los radios por un lado, el flanco interior por otro y el flanco exterior por otro).



Imagen 3.4. De izquierda a derecha: llanta de una pieza, llanta de dos piezas y llanta de tres piezas.

3.3. Llantas de los monoplazas anteriores

Desde que se creó el equipo de *Formula Student* en la universidad se han diseñado 6 monoplazas con características diferentes. Por lo que las llantas también se han ido modificando para adaptarse a las características de cada monoplaza.

Las llantas del primer diseño del CAT01 eran el modelo Formrace 16 de la marca Braid. Eran de aleación de aluminio fabricadas con la tecnología de forjado rotativo a media temperatura. Tenían unas medidas de 7.0x13', con un offset de 31mm y 3.6kg de peso. Estas llantas se fijaban al buje mediante 4 tuercas facilitando el diseño del mismo.

El CAT02 utilizó las mismas llantas pero con una ligera modificación. El diseño de las llantas se modificó para adaptarlo a un buje con mono tuerca.

En el CAT 03, el CAT04 y el CAT05e utilizaron unas llantas del modelo "Superleggera" de la marca OZ Racing con unas características parecidas. Se conservan las medidas de 7.0x13'. El offset se varía a 22mm. Siguen siendo de aleación de aluminio pero con un peso ligeramente superior 4,2 kg. Se mantiene la fijación con el buje mediante mono tuerca.



Imagen 3.5. A la izquierda la llanta Braid utilizada en los CAT01 y 02. A la derecha la llanta OZ Racing utilizada en el CAT03, 04 y 05.

El principal inconveniente de estas llantas es que son relativamente pesadas (4,2 kg). Teniendo en cuenta que la masa total esperada del coche es de 270 kg, las llantas escogidas representan el 6,2% de la masa total. La masa de cada neumático es de 5 kg, lo que hace que cada rueda pese un total de 9,2 kg. Las ruedas representan el 13,6% de la masa total del vehículo.

4. Estudio Dinámico

4.1. Masa suspendida y masa no suspendida

Para empezar a hablar de la relación que tienen las llantas con la dinámica del vehículo es importante definir los conceptos de masa suspendida y masa no suspendida.

La masa suspendida es aquella masa del vehículo que se encuentra soportada por los amortiguadores y los muelles. Lo compondrían todo el conjunto del chasis y sus ocupantes.

La masa no suspendida es toda aquella masa a la cual no está aguantada por la suspensión. Es decir toda aquella masa que no se encuentra influida por los efectos de los amortiguadores. La masa no suspendida la componen las ruedas, llantas, sistema de frenos y trapecios.

En el modelo simple de las suspensiones para un cuarto de un vehículo no se tienen en cuenta la elasticidad del neumático y se puede caracterizar como en la Imagen 4.1.

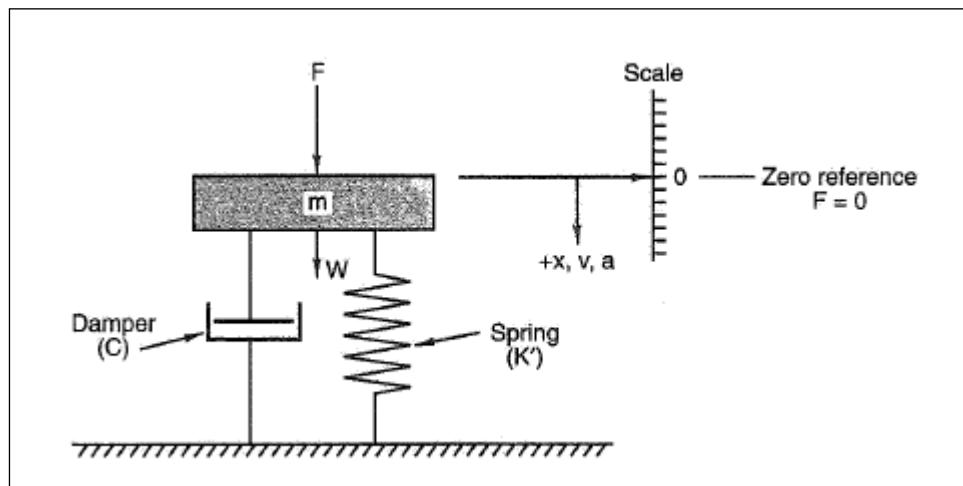


Imagen 4.1. Representación gráfica de del modelo matemático de un cuarto de vehículo de un grado de libertad

En el modelo de dos grados de libertad se tiene en cuenta la rigidez del neumático por lo que la masa no suspendida del coche también se ve influida por la frecuencia propia del neumático.

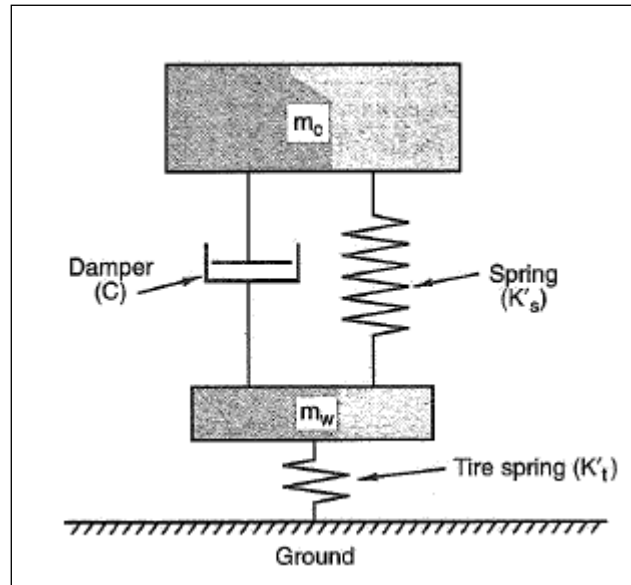


Imagen 4.2. Representación gráfica de del modelo matemático de un cuarto de vehículo de un grado de libertad

4.2. Influencia de la masa no suspendida en la dinámica del vehículo

Para que un coche sea controlable, el neumático debe permanecer en constante contacto con la superficie y con una cantidad considerable de fuerza (normal) sobre ella.

Para hacer esto el sistema de suspensiones de los coches deben ser capaces de seguir el camino y todas sus imperfecciones. El tiempo de respuesta de la suspensión puede ser caracterizado por su frecuencia natural. Un modelo simple del sistema de suspensión asume que la masa suspendida sea fija, el neumático rígido y la masa no suspendida oscila libremente ignorando el amortiguamiento del neumático. Este sistema está caracterizado por la ecuación:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{m_1}{k_2}} \quad (\text{Ec. 4.1})$$

Donde w_0 es la frecuencia natural de amortiguamiento, k_2 es la constante elástica de la suspensión. A partir de la ecuación se puede derivar que una disminución de la masa no suspendida incrementa la frecuencia natural, permitiendo que la respuesta de la suspensión sea más rápida. Si más bien se puede llegar al mismo resultado aumentando la rigidez de la suspensión pero esto disminuye el recorrido de la suspensión y significa que la suspensión necesita cada vez más de una superficie más lisa. Por esto el peso ideal de la masa no suspendida es cero, por lo que la suspensión con un muelle suave le permita a la rueda pueda seguir todas las ondulaciones del terreno sin perder el contacto.

Usando un sistema de dos grados de libertad teniendo en cuenta la rigidez vertical del neumático las ecuaciones del movimiento son:

$$m_1 \ddot{x}_1 = -k_1 x_1 + k_2 (x_2 - x_1) \quad (\text{Ec. 4.2})$$

$$m_2 \ddot{x}_2 = -k_2 (x_2 - x_1) \quad (\text{Ec. 4.3})$$

Donde \ddot{x}_1 y \ddot{x}_2 son las aceleraciones de la masa no suspendida y de la masa suspendida respectivamente, m_1 y m_2 son las masas, k_1 y k_2 son las constantes elásticas del neumático y del muelle de suspensiones, x_1 y x_2 son las posiciones de la rueda y del chasis respectivamente. Reordenando las ecuaciones 4.2 y 4.3 para ver una aceleración en función de la otra aceleración y de la masa tenemos:

$$\ddot{x}_1 = -\frac{k_1 x_1}{m_1} - \frac{m_2 \ddot{x}_2}{m_1} \quad (\text{Ec. 4.4})$$

$$\ddot{x}_2 = -\frac{k_1 x_1}{m_2} - \frac{m_1 \ddot{x}_1}{m_2} \quad (\text{Ec. 4.5})$$

Reduciendo m_1 incrementa \ddot{x}_1 lo que permite que la rueda permanezca en contacto con la carretera. Un aumento de m_2 reduce \ddot{x}_2 permitiendo que el chasis se mantenga relativamente constante. Entonces se ve que si el cociente entre m_2 / m_1 tiende a infinito la respuesta de la suspensión se incrementa y se reduce el desplazamiento del chasis, proporcionando un manejo del vehículo más cómoda para el conductor, mientras mejora su conducción.

Para mejorar la relación entre las masas es posible utilizar un lastre en el chasis para aumentar la masa suspendida, sin embargo la aplicación de la segunda ley de movimiento de Newton en esta situación implica que se reducirá la aceleración del vehículo, y esto

conlleva que en una situación de carrera de aumentar los tiempos por vuelta de los coches. Esto deja la solución más conveniente al problema, que es reducir la masa no suspendida del vehículo.

Este efecto se puede ver gráficamente en la Imagen 4.3. donde la llanta con menor peso recupera el contacto con el suelo más rápidamente que las ruedas más pesadas.

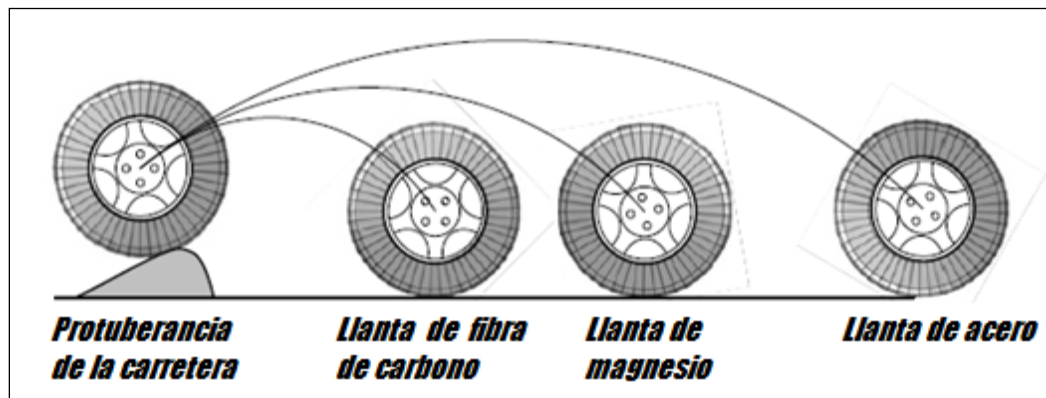


Imagen 4.3. Comportamiento de llantas de diferentes materiales en frente de una irregularidad del terreno

En el siguiente gráfico (Fig. 4.1) se ha extraído de una simulación virtual con el programa MATLAB donde se compara la respuesta frecuencial $[H(j\omega)]$ de una llanta de aluminio y una llanta de fibra de carbono con una masa inferior. El código del programa está detallado en el anexo I. Se observa que el primer pico corresponde a la frecuencia propia de la masa suspendida y el segundo pico corresponde a la frecuencia propia de la masa no suspendida. Como se puede observar al reducir la masa de la llanta reducimos la masa no suspendida del vehículo y por lo tanto el módulo de la frecuencia propia de la masa no suspendida.

En los vehículos de calle esto no interesa demasiado ya que en éstos prima la comodidad de los ocupantes a que la rueda esté en todo momento en contacto con el suelo.

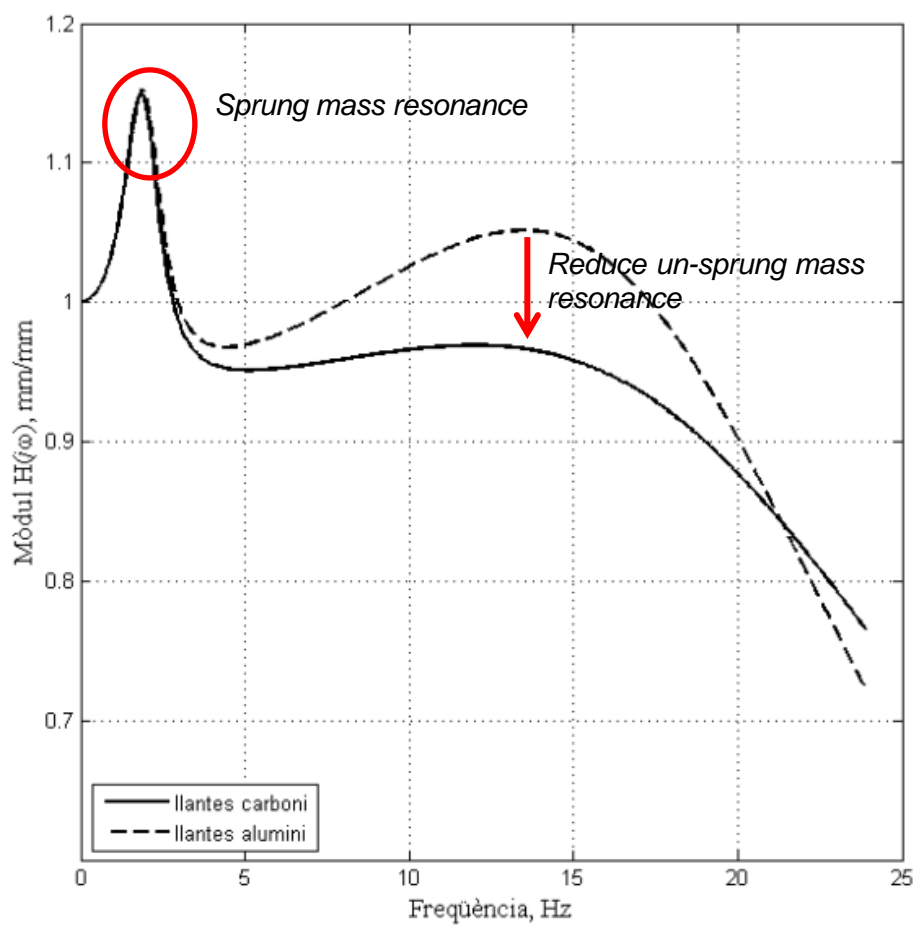


Fig. 4.1. Comparación de la respuesta frecuencial de una llanta de aluminio y una llanta de fibra de carbono

5. Estudio de alternativas

En este apartado se tratarán las distintas posibilidades de fabricación de una llanta que se han tenido en cuenta para encontrar la llanta más adecuada a nuestras necesidades.

Primero de todo se ha tenido en cuenta el diámetro de la llanta. Teniendo dos diámetros como alternativas, de 10 y 13 pulgadas. Se escogen estas medidas porque por un lado la llanta de 13' es la medida que históricamente ha utilizado el equipo ETSEIB Motorsport, y la medida de 10' se ha escogido porque en un monoplaza de competición es importante reducir el peso, y diseñar una llanta más pequeña automáticamente hace reducir el peso global del monoplaza.

Diámetro	10'	13'
Peso conjunto rueda	4	2
Compatibilidad con componentes vecinos	1	5
Precio de fabricación	3	2
Compatibilidad con llantas OZ Racing (año anterior)	1	5
Precio neumático	5	1
Total	14	15

Tabla 5.1. Matriz de estudio de funciones de alternativas diferentes diámetros

En segundo lugar se ha tenido en cuenta tres tipos de diseño de llantas a igualdad de su diámetro. Los diferentes diseños tienen la característica de que utilizan diferentes tecnologías de fabricación y familias de materiales distintos.

El primer diseño de una llanta fabricada totalmente de fibra de carbono por su carácter innovador y la buena relación resistencia-peso de la fibra de carbono. No se plantean otros tipos de materiales compuestos ya que la fibra de carbono es la que cuenta con una resistencia y el módulo específico mayor en frente de fibras de vidrio y fibras de aramida. En el anexo F se ha estudiado con más detalle los distintos tipos de fibras.

El segundo se basa en unas llantas de aleación de magnesio atendiendo a que la mayoría de fabricantes de llantas utilizan este material para las llantas destinadas a vehículos del motorsport y se les supone un carácter más conservador y robusto. No se considera el

acero o el aluminio por su peor relación resistencia-peso. La aleación de magnesio es un 35% más ligero que el aluminio (peso específico del magnesio $1,74 \text{ g/cm}^3$, del aluminio $2,7 \text{ g/cm}^3$ y del acero $7,8 \text{ g/cm}^3$).

Y la última, con los radios de magnesio y la parte del aro exterior de fibra de carbono por su compromiso entre la innovación y la robustez.

Tipo	Fibra de carbono	Aleación de magnesio	Carbono + radios de aleación de magnesio
Resistencia mecánica específica	5	4	3
Dificultad de fabricación	3	1	3
Innovación	5	3	4
Coste	2	2	3
Resistencia a la fatiga	5	2	3
Conducción del calor	1	5	3
Posibilidad de patrocinio	5	1	4
Total	26	18	23

Tabla 5.2. Matriz de estudio de funciones de alternativas diferentes diseños

5.1. Estudio de las funciones

Las funciones que se han estudiado en el apartado relacionado con el tamaño de la llanta tienen los criterios de comparación siguientes:

Peso conjunto rueda: el peso del conjunto rueda es importante para la dinámica del vehículo. Se mira el peso del conjunto rueda ya que la reducción del tamaño de la llanta obliga reducir todos los componentes que se encuentran relacionados con la llanta. La reducción de tamaño implica una reducción del peso del sistema de frenos, buje, mangueta y lo más importante el neumático que aporta la mayor parte de la masa del conjunto. En el anexo J se pueden ver el peso de los distintos neumáticos Hoosier. Como la diferencia de peso tampoco es excesivamente grande se valora con un 4 la llanta de 10' y con un 2 la llanta de diámetro 13'.

Compatibilidad con componentes vecinos: el tamaño de la llanta influye en el diseño de los componentes cercanos. Mantener el mayor número de componentes del año

anterior tiene el beneficio de que económicamente no se ha de invertir una cantidad elevada de dinero en la fabricación de nuevos componentes. La incorporación de una llanta de 10' implica un diseño nuevo de todos los componentes del sistema ruedas, suspensiones, el conjunto de frenos y chasis con un diseño nuevo de monocasco adaptando los nuevos puntos de suspensiones. Por este motivo tomará el valor de 5 si no se ha de diseñar nuevos componentes, llanta de diámetro 13', y un 1 a la llanta de 10' debido a que implica diseñar todos los componentes relacionados con el conjunto rueda.

Precio de fabricación: en un proyecto de ámbito universitario es importante reducir los costes, por lo que la cantidad de material es proporcional al coste. Si se tiene en cuenta un mismo material para los distintos diámetros, el aumento de diámetro no implica un aumento de precio demasiado elevado al pasar de 10' a 13'. Por lo que se le da un valor de 3 a la llanta de 10' y un 2 a la llanta de 13'.

Compatibilidad con llantas OZ Racing del año anterior: en caso de rotura mecánica por algún motivo durante el transcurso de una competición o durante las pruebas es importante tener recambios rápidamente. Por lo que se valora con un 5 si son compatibles (llanta de 13') y un 1 si no lo son (llanta de 10').

Precio neumático: En el mundo de la competición automovilística los neumáticos son un componente consumible esencial. Durante una temporada se pueden utilizar varios juegos de neumáticos por lo que su precio es importante. Teniendo en cuenta el desgaste y posibles pinchazos se pueden llegar a utilizar entre 3 y 4 juegos de neumáticos slicks más un juego para lluvia, unos 20 neumáticos por temporada. Entre un neumático de 10' y uno de 13' no hay mucha diferencia de precio pero éste aumenta considerablemente si se han de comprar varios neumáticos para afrontar una temporada entera. En el anexo J se puede ver el precio de los distintos neumáticos Hoosier. Por lo tanto se valorará con un 5 al neumático más barato y un 1 al más caro.

En relación a la segunda tabla de alternativas, la referente al tipo de diseño de llanta las funciones tienen los siguientes criterios:

Resistencia mecánica específica: como ya se ha comentado anteriormente en este proyecto el peso es fundamental para la dinámica del vehículo. La resistencia de la pieza también es importante para diseñar una pieza que resista los esfuerzos. La utilización de diferentes materiales implicara densidades y resistencias diferentes para cada opción. Se valora con un 5 una relación resistencia mecánica – peso elevado y con un 1 si tiene una relación resistencia mecánica – peso bajo.

Dificultad de fabricación: como el proyecto sea se realizar dentro del ámbito universitario y la mayor parte se ha de fabricar en la universidad por los componentes del

equipo, se valora con un 5 si se puede fabricar por los miembros del equipo dentro de la universidad y con un 1 si se ha de externalizar. Por lo que toda opción que requiera de un fresado, una fundición o una forja, tendrá que ser externalizado. Por lo tanto la utilización de la aleación magnesio requerirá de su externalización. Mientras que la utilización de la fibra de carbono podrá ser realizada por miembros del equipo, aunque hay algún proceso como el fresado de los moldes también habrá que externalizarlo.

Innovación: La innovación es un concepto más abstracto, se trataría de un equilibrio entre el nivel de innovación tecnológica dentro mismo del equipo, entre los diferentes equipos de la competición y del mundo del motor en general. La innovación pues, será un factor a tener en cuenta de cara a la prueba estática de *design*. Se tomará el valor de 5 si es un componente innovador y un 1 si no lo es. Por ejemplo, en el mercado no existe una llantas en fibra de carbono, ni existen demasiados equipos de Formula Student que utilicen este material en el diseño de sus llantas por lo que se valorará con un 5 la utilización de este material en su diseño.

Coste: Se valora si tanto el diseño como los materiales tienen un bajo coste tanto de fabricación como de los materiales. Se valora con un 5 si tiene un precio bajo y con un 1 si el coste es elevado.

Resistencia a la fatiga: Este concepto también dependerá del diseño, por lo que se valora si el material utilizado tiene un comportamiento mejor frente a la fatiga. En los gráficos del anexo F se pueden ver el comportamiento de las diferentes familias de materiales frente a la fatiga. Por lo que se valorará con un 5 si tiene un buen comportamiento y un 1 si no.

Conducción del calor: una llanta debe ser buena conductora del calor para poder disipar el calor generado por otros componentes cercanos, como podrían ser los frenos. Por lo que toma el valor de 5 en el caso de utilizar un material que sea buen conductor o un 1 si no lo es.

Posibilidad de patrocinio: Este aspecto es el más importante, ya que será fundamental en la posibilidad de ser fabricado. A pesar del coste de fabricación es importante tener en cuenta si parte de su fabricación o su totalidad puede ser asumido por una empresa externa a la universidad. Tomará un valor de 5 si el equipo cuenta con algún patrocinador y con un 1 si no.

5.2. Análisis de los resultados

Los resultados se han obtenido de la suma de los valores asignados a cada opción de diseño para cada función. De esta manera hemos obtenido las opciones más adecuadas.

Como se puede observar los resultados han salido muy parecidos en las dos matrices de alternativas.

En la primera matriz de alternativas, donde se analizaba los dos posibles tamaños de llantas ha salido como más adecuada la llanta de diámetro de 13'. Esta opción ha únicamente ha tenido 1 punto más que la llanta de diámetro 10'. Todo y que el resultado puede parecer poco significativo, se llevará a cabo la opción con la puntuación más elevada. Todo y que parece que la opción de 10' sea la opción dinámicamente preferible, se le da un valor añadido a la compatibilidad con las llantas de los años anteriores en caso de posible fallada mecánica y a la compatibilidad con los diseños de los componentes vecinos del año anterior, ahorrando así un gasto adicional en la fabricación de nuevos componentes.

En la segunda matriz, en la cual se analiza el tipo de diseño y materiales a utilizar se observa que la opción con mayor puntuación es la opción de un diseño íntegramente de fibra de carbono. En esta matriz, al igual que en la matriz de opciones de tamaño de la llanta, ha salido un resultado muy parejo. La opción con mayor puntuación ha sido únicamente 3 puntos superior. En este caso también se ha optado por la opción con mayor puntuación ya que se ha contado con dos patrocinadores fundamentales. NEXUS PROJECTES que ha colaborado con el suministro de material, la utilización de sus instalaciones y con el asesoramiento técnico en la fabricación, y con PROTO-TECH SYSTEMS que ha colaborado con el fresado de los moldes. Con estos dos patrocinadores el coste de la fabricación total de las llantas ha sido prácticamente nulo.

Por lo tanto uniendo las dos matrices hemos obtenido que la opción más adecuada ha sido el diseño de una llanta de diámetro de 13' íntegramente de fibra de carbono.

5.3. Selección del material y el proceso de fabricación

El diseño que ha dado como resultado de la matriz de alternativas es el del diseño de una llanta completamente en fibra de carbono, Ahora se ha de decidir el método de fabricación.

Para laminar piezas en fibra de carbono tenemos cuatro opciones: laminar con fibra seca y por vía húmeda, laminar con fibra seca y por vía húmeda y vacío, laminar con fibra seca e infusión y con fibras pre-impregnadas de resina (prepreg).

Se escoge para la fabricación de la pieza final el proceso mediante fibra pre-impregnada debido a que es el método que ofrece unas mejores prestaciones mecánicas con un bajo peso debido al control y optimización de la resina que se usa en su laminación. Además este tipo de fibra ofrece una gran facilidad para orientar las fibras en cada capa a la hora de laminar dejando unos acabados superficiales de alta calidad. Este método tiene un par de inconvenientes. El primero es que el precio de la fibra es el más caro de todos y en segundo lugar necesita ser curado en un horno autoclave.

Dentro de la familia de los pre-impregnados existen diferentes tipos de fibras con diferentes propiedades dependiendo de la manera en que estas están tejidas.

Las fibras pueden estar trenzadas para proporcionar resistencia en las direcciones necesarias. Por lo tanto, la selección de la trama de un tejido para ser utilizado es importante para las propiedades finales de los productos. Para tejer una tela se utilizan dos orientaciones de las fibras, estas toman el nombres urdimbre y la trama según su orientación. Las fibras de la urdimbre son fibras continuas que se establecen a lo largo de la longitud del rollo de tejido, las fibras de la trama son perpendiculares al ancho del rodillo.

En la selección de la tela son importantes la capacidad de drapeado de los tejidos (la facilidad con la que un tejido se ajustará a una superficie sin la formación de arrugas, y la fuerza de la tela a lo largo de los ejes principales, la orientación específica de la tela se define por el uso que se tenga previsto.

Podemos encontrar telas con las fibras en una única dirección (*UD*) o con las fibras entrecruzadas.

Las fibras *UD* tienen todas las fibras orientadas en una misma dirección por lo que únicamente pueden soportar fuerzas siguiendo esa dirección, aunque estas puedan soportar mayores cargas que el resto de tejidos.

El estilo del tejido puede variar de acuerdo con el trenzado de las fibras y la facilidad con las que éstas se pueden amoldar a una superficie. Un bajo trenzado da un mejor rendimiento mecánico porque las fibras rectas pueden soportar cargas mayores, un tejido drapeable es más fácil de poner hasta con las formas más complejas.

Hay tres estilos principales de tejer los materiales compuestos el *plain weave* que ofrece una baja drapeabilidad y un alto trenzado de las fibras, el *satín weave* que ofrece una muy

buena drapeabilidad y un bajo trenzado y el *twill weave* se encuentra entre medio de los dos anteriores.

Plain weave es el tejido más común utilizado ya que no hay cara dominante de urdimbre o de la trama a considerar durante la fabricación, lo que significa que tiene las mismas propiedades en ambas direcciones principales. Los tejidos *plain weave* tienen una resistencia relativamente baja debido a las ondulaciones constantes de su tejido y su relativamente difícil recuento de capas.

Twill weave es cuando uno hilo de la trama se entre cruza por encima dos hilos de la urdimbre y después pasa bajo otros dos, formando una constante diagonal de hilos de trama e hilos de urdimbre alternativamente. Este es un tipo común de tejido y tiene una mejor capacidad de drapeado sobre una curva compleja en comparación con un tejido liso, este hecho se debe a que las fibras tienen más libertad de movimiento entre ellas.

Satin weave es parecido al *twill weave* pero dejando más de 3 hilos por encima y por debajo. No se utiliza demasiado por sus parecidas características con la fibra UD, pudiendo utilizar esta última en el mayor de los casos al ser más económica y más abundante.

PLAIN WEAVE

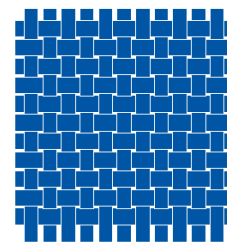
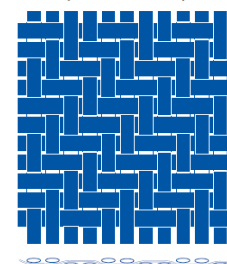
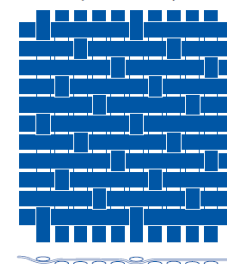
TWILL WEAVE
(2/1, 3/1, 2/2)SATIN WEAVE
(4, 5, 8, 11)

Imagen 5.1. Esquema de los tejidos *plain weave*, *satin weave* y *twill weave*

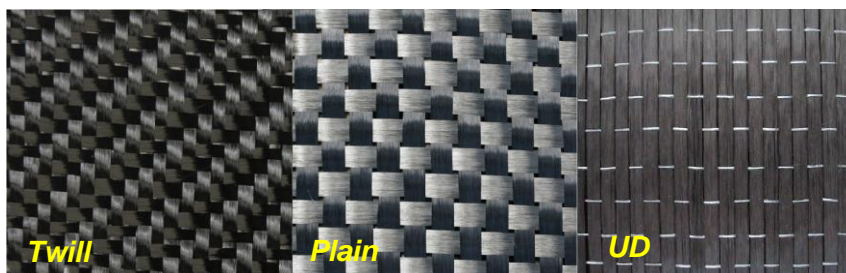


Imagen 5.2. Imagen de tipos de tejidos *Twill*, *Plain* y *UD*

Como se ha visto anteriormente las fibras son anisotrópicas, por lo tanto para que una pieza tenga unas propiedades mecánicas lo más isotrópicas posibles, las diferentes capas se colocan con diferentes orientaciones. Se suelen alternar capas con la trama a 0°, 90°,

45° y -45°. También se pueden combinar capas con distintas orientaciones para obtener más resistencia en determinadas direcciones.

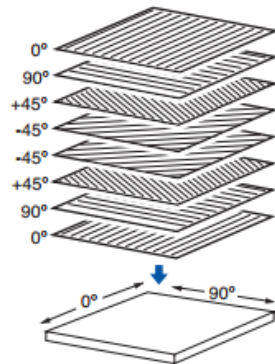


Imagen 5.3. Lámina casi-isotrópica

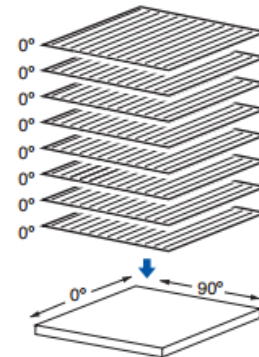


Imagen 5.4. Lámina unidireccional

En la Tabla 5.3 recoge en forma de resumen las características de cada tipo de tejido. Se escoge el tejido. De este modo se escoge el tejido twill 2/2, es decir la trama se cruza por encima de dos hilos de la urdimbre y después pasa bajo otros dos, ya que presenta esfuerzos elevados en la dirección principal y en su dirección perpendicular y se adapta fácilmente a cualquier tipo de superficie.

	Fuerzas en la dirección principal	Fuerzas en la dirección principal	Drapeabilidad
Plain weave	Moderada	Moderada	Baja
Twill weave	Moderada	Moderada	Moderada
UD	Excelente	Baja	Excelente

Tabla 5.3. Comparación de las propiedades de los Tejidos de fibra de carbono

Para realizar componentes en fibra de carbono es necesario partir de un molde donde colocar la fibra. Por lo que una vez se ha definido el proceso de laminación es definir qué tipo de molde se utilizará. Al laminar con fibra pre-impregnada es necesario curar la pieza a altas temperaturas y altas presiones por lo que limita los materiales a utilizar como moldes.

Para la fabricación de éstos además se ha de pensar que se realizarán varias piezas, como mínimo un juego entero de llantas (4 llantas), por lo que el molde ha de ser resistente y duradero.

Los materiales de los moldes que podrían entrar en el horno autoclave encontramos el aluminio, placa master de epoxi, fibra de vidrio o fibra de carbono. Las dos últimas opciones necesitaran de un modelo previo que no necesitaría entrar en el horno autoclave como podría ser la placa master de poliuretano de baja densidad.

De estos materiales el aluminio es el más costoso de mecanizar por lo que se descarta. Los bloques de placa master de epoxy son los materiales que tienen un precio más elevado por lo que también se descarta. Una vez descartados los moldes de aluminio y de placa master de epoxy se ha de escoger entre un molde de fibra de vidrio o uno de fibra de carbono. Se escoge el molde de fibra de carbono ya que al ser el mismo material que la pieza final, el molde y la pieza tendrán coeficientes de dilatación iguales. De esta manera se aseguran las tolerancias dimensionales de la pieza. El molde de fibra de carbono también asegura una gran durabilidad superior a los otros materiales además de ser fácilmente reparable. Según la experiencia de NEXUS Projectes un único molde de fibra de carbono se puede llegar a utilizar para la fabricación de alrededor de las 200 piezas.

Para finalizar se ha de decidir el material y el proceso de laminado tanto del modelo como del molde.

Para el modelo se decide utilizar bloque de placa master de poliuretano baja densidad ya que ofrece una buena mecanizabilidad, ofrece muy buena estabilidad dimensional y no es poroso.

Para el laminado se decide utilizar el proceso por infusión ya que permite la laminación en varias etapas y varios días. Ofrece unos buenos resultados y por último era uno de los procesos de fabricación en fibra de carbono que el equipo aún no había utilizado nunca. Al contar con el asesoramiento de NEXUS Projectes se decide utilizar la infusión y dotar al equipo de un mayor conocimiento en el mundo de las fibras y su posible utilización en próximos proyectos.



Imagen 5.5. Proceso de infusión de un molde

6. Planificación y desarrollo del proyecto

6.1. Tiempo de ejecución

Este proyecto está englobado dentro de un proyecto mayor como es la construcción del CAT06e. De esta manera los tiempos de ejecución se tendrán que adaptar a los tiempos de ejecución del proyecto que lo engloba.

El proyecto empieza con la formación del equipo el 1 de octubre y finaliza con la última competición en Italia el 16 de septiembre del año siguiente. Por lo que el tiempo de ejecución de este proyecto debería estar acotado por estas fechas.

6.2. Fases del proyecto

El desarrollo de este proyecto está dividido en diferentes fases.

- **Toma de contacto y recogida de información:** es el primer paso de un ingeniero proyectista que consiste en recopilar toda la información necesaria sobre el producto a desarrollar, buscar empresas que se dediquen a este producto y generar un primer presupuesto general para poder llevar a cabo las siguientes fases con éxito. Este es un proceso básico en todo tipo de proyecto. Aunque el tiempo de ejecución de este proyecto empieza con la nueva temporada 2012/2013 esta fase se empieza durante el final de la temporada anterior. Durante las competiciones se empieza a recoger información de miembros de otros equipos de FS. (120h)
- **Estudio de alternativas:** una vez se ha asimilado la información recogida se hace un estudio de propuestas de diseño y se evalúan según las puntuaciones de las funciones. Paralelamente a este proceso se empieza a contactar y definir una estrategia de colaboración con posibles proveedores de material. Al final de esta fase se decide las características del diseño de la llanta.
- **Diseño previo:** se hace un primer diseño a partir de la información adquirida en el apartado anterior. A partir de este diseño se hacen todas las simulaciones de elementos finitos con las condiciones de contorno lo más reales posibles. A partir de los resultados obtenidos se hacen las modificaciones pertinentes en el diseño y se vuelve a hacer las simulaciones. Este es un proceso iterativo hasta conseguir los

resultados que se consideran óptimos. Durante este proceso iterativo también se comprueba que no interfiera con ningún otro componente. (40h)

- **Diseño definitivo:** una vez se ha llegado a los resultados de las simulaciones óptimos y se comprueba que no hay ninguna interferencia con ningún otro subsistema se congela el diseño. Se cierran los acuerdos de colaboración con empresas y el nivel de esponsorización. Se cierran los acuerdos con PROTO-TECH System colaborando con el fresado en placa master de los modelos y NEXUS Projectes con la colaboración de material y la utilización de sus instalaciones donde realizar el prototipo. En esta fase se elabora un presupuesto en detalle.
- **Fase de aprovisionamiento de material:** en esta fase se reúne el material necesario para la elaboración de un primer prototipo. En este proceso el periodo de espera varía en función de la empresa proveedora. En nuestro caso las empresas ceden el material al equipo en forma de colaboración no se les puede exigir los plazos de entrega que normalmente realizan, sino que el equipo se ha de adaptar al volumen de trabajo que la empresa tenga en ese momento, por lo que normalmente los plazos de entrega son bastante más elevados.
- **Construcción del primer prototipo:** esta fase se divide en dos procesos, la primera es la preparación del modelo y la fabricación del molde (70h), y la segunda es la preparación del molde y fabricación del prototipo final (90h).

Debido al periodo de tiempo tan corto que se tiene para la finalización de la construcción del monoplaza y la poca disponibilidad de las empresas colaboradoras este proyecto únicamente se llevará a cabo hasta este punto. Las siguientes fases se llevarán a cabo durante la siguiente temporada por el nuevo equipo del CAT 07.

- **Pruebas y validación:** en esta etapa se harán los ensayos sobre el prototipo final para verificar que no ha habido ningún fallo de diseño y si lo ha habido poder hacer los cambios necesarios antes de hacer la pieza final. Esta etapa también dependerá de la colaboración de una empresa externa a la universidad por lo que las pruebas se harán dependiendo de la disponibilidad de la misma. Si las simulaciones se han hecho correctamente esta fase únicamente tendría que servir como validación de las simulaciones y la confirmación de que el producto final servirá para su fin.
- **Segundo aprovisionamiento de material:** para realizar las llantas finales se ha prever el material necesario.
- **Construcción del producto final:** una vez se haya testeado el primer prototipo y se verifique que la llanta puede soportar los esfuerzos necesarios sin que sufra una

rotura se laminará el primer juego de 4 llantas. Este proceso se realizara sobre el mismo molde para reducir costes, por lo que el proceso durara cuatro veces lo que se tarda en producir una sola llanta.

Con las llantas ya diseñadas vienen las fases propias de las pruebas y puesta a punto del monoplaça completo seguido de las competiciones.

Para cumplir con los plazos establecidos se ha de tener en cuenta posibles imprevistos, como errores o retrasos en las entregas de material. Los márgenes de maniobra en las distintas fases harán posibles la finalización del proyecto dentro de su tiempo de ejecución.

En el anexo C se puede ver el master plan completo del proyecto.

<i>Id.</i>	<i>Nombre de tarea</i>	<i>Comienzo</i>	<i>Fin</i>	<i>Duración</i>
1	Recogida de información	01/10/2012	19/11/2012	7s 1d
2	Estudio de alternativas	22/10/2012	27/10/2012	1s
3	Búsqueda de empresas colaboradoras	22/10/2012	01/12/2012	6s
4	Diseño previo	29/10/2012	08/12/2012	6s
5	Diseño definitivo	10/12/2012	20/12/2012	1s 4d
6	Cierre de acuerdos de colaboración	03/12/2012	15/12/2012	2s
7	Aprovisionamiento de material	17/12/2012	16/02/2013	9s
8	Fabricación de los moldes	28/01/2013	13/02/2013	2s 3d
9	Fabricación del prototipo	18/02/2013	09/03/2013	3s
10	Pruebas y validación	11/03/2013	23/03/2013	2s
11	Segundo aprovisionamiento de material	25/03/2013	20/04/2013	4s
12	Construcción de las llantas definitivas	22/04/2013	29/06/2013	10s
13	Pruebas y puesta a punto del CAT06e	01/07/2013	27/07/2013	4s
14	FSGermany	30/07/2013	05/08/2013	1s
15	FSSpain	28/08/2013	02/09/2013	5d
16	FSItaly	13/09/2013	16/09/2013	3d

Tabla 6.1. Fases del proyecto y su duración

7. Diseño y simulaciones

La llanta está diseñada para cumplir con los requisitos mínimos de rigidez y resistencia conociendo las dimensiones críticas de la llanta.

El diseño inicial es analizado en términos de rigidez en contraposición al peso, y después se irá alterando el diseño a través de cambios en el laminado del material compuesto o la cantidad de capas de los materiales que intervienen en el producto, para mejorar la rigidez y la resistencia. Este proceso iterativo se realizará hasta que se alcance un compromiso razonable entre la rigidez, resistencia y peso.

Todo diseño de la llanta, modelos y moldes se realizan con el programa de diseño CAD Solid Works. Primero se diseña la pieza o llanta en nuestro caso teniendo en cuenta los factores de diseño, restricciones y factibilidad. El segundo paso es realizar las simulaciones pertinentes. Para finalizar se diseñan los moldes y modelos en función de la pieza final.

7.1. Restricciones en el diseño

Una de las características del CAT06e es que es una evolución del CAT05e. De esta manera hay muchos componentes que se conservan o si más no, varían muy poco de un año a otro.

Se diferencian dos tipos de restricciones. Por un lado el diseño ha de ser compatible con las llantas OZ Racing del año anterior, y por el otro, se ha de adaptar al diseño de los subsistemas que se mantienen.

7.1.1. Compatibilidad

Durante la competición se suelen usar más de un juego de llantas. Normalmente se usa un juego de llantas para los neumáticos *slicks* y un juego de llantas para los neumáticos de lluvia.

Este proyecto solamente contempla la fabricación de 1 juego de llantas que se usaran para el juego de neumáticos *slicks* por lo que es necesario utilizar el juego de llantas del año anterior para los neumáticos de lluvia.

De esta manera también se soluciona el hecho de tener recambios en caso de fallada mecánica. Las llantas es un elemento fundamental para el funcionamiento del monoplaça.

De esta manera se tendría una solución rápida y sencilla que evitaría no poder participar en todas las pruebas de la competición si sucediera algún problema.

En el caso de tener un pinchazo o un deterioramiento repentino en un neumático durante la prueba tampoco afectaría. En todo caso el disponer de un juego adicional, sumado al de los dos juegos de llantas de los años anteriores, supondría disponer en cualquier momento de un juego de llantas con neumáticos nuevos a punto de ser utilizado en cualquier momento. Sin que este hecho comporte la pérdida de tiempo de tener que llevar la llanta a un lugar especializado a cambiar el neumático. De esta manera se podría seguir participando en la competición mientras se esté cambiando los neumáticos maltrechos. El cambio de llantas tampoco supondría cambiar el juego entero, únicamente es necesario cambiar la pareja, montar dos llantas iguales delante y dos llantas iguales detrás.

Una de las propiedades que hace que ambos tipos de llanta sean compatibles es el diámetro de la llanta. Esta característica de diseño ya se ha tratado en las matrices de alternativas del apartado **5. Estudio de alternativas**. Al salir la opción con diámetro de 13' este problema queda resuelto.

Por otro lado, la otra premisa de diseño que implica que sean compatibles es el offset de la llanta. No tener el mismo offset implicaría tener distintos anchos de vía afectando directamente a la dinámica del vehículo.

Las llantas OZ Racing tienen un offset positivo de 22 mm por consiguiente las nuevas llantas se diseñaran con un offset de +22 mm, como se puede ver el plano 1 del anexo de planos.

7.1.2. Interacción con otros componentes

Para el CAT05e se diseñaron todos los componentes del sistema de ruedas, suspensiones y frenos en función de las llantas. Estos sistemas se mantienen o se mejoran, pero con ligeros cambios, por tal de reducir al máximo el presupuesto.

Sistema de frenos: únicamente se modifican las pinzas y los discos traseros. Se colocan unas pinzas de la marca Brembo más pequeñas y se reduce el diámetro del disco de freno. Las pinzas de freno delanteras no se modifican y tienen un tamaño mayor que las traseras. El diámetro del disco de freno no se modifica, por lo que las nuevas pinzas no influirán demasiado en el diseño ya que el sistema de frenos delantero sigue siendo el crítico.

Sistema de suspensiones: de la parte delantera se modifican ligeramente los puntos de suspensión. Se modifican tanto de la parte del monocasco como de la parte de la

mangueta. Respecto a los puntos del CAT05e se modifican las distancias del orden de milímetros para adaptar el nuevo diseño del *pull rod*.

En la parte trasera los cambios son mayores. Se modifican los puntos para la nueva situación de los amortiguadores y del nuevo diseño de pull rod. Pero en este caso este diseño se adaptará al diseño de las nuevas llantas.

Sistema ruedas: se mantiene tanto el diseño de las manguetas como de los bujes delanteros. El buje trasero se modifica ligeramente adaptándose al nuevo conjunto de frenos traseros pero no interfiere en el diseño de la llanta. En el nuevo diseño se tendrá que modificar la mono tuerca para adaptarse al nuevo diseño de llanta. Se puede ver el plano de la nueva monotuerca en el plano 3 del anexo de planos.

7.1.3. Factibilidad de fabricación y diseño de moldes y modelos

A la hora de diseñar una pieza se ha de tener en cuenta cuál será su proceso de fabricación y que se pueda llevar a cabo su fabricación.

El proceso de fabricación de estas llantas es mediante la laminación en fibra de carbono sobre unos moldes fabricados también en fibra de carbono, y éstos a la vez son laminados sobre unos modelos fresados sobre placa master de poliuretano de baja densidad (PROLAB 45). La característica de este material es que es blando y por lo tanto fácil de mecanizar. En el anexo M se puede ver la ficha técnica del PROLAB 45.

La llanta final está diseñada para fresar el mínimo número de modelos posible. Un modelo es la pieza final fresada en un material blando utilizado para laminar el molde. Y un molde es el negativo de la pieza final, donde se lamina la llanta.

Se parte de 3 modelos. Un modelo que se le llamará modelo principal que corresponde a la llanta fresada sobre placa master, el modelo auxiliar que corresponde a una “tapa” también fresada en placa master para poder fabricar el primer molde, y el modelo central que a la vez está diseñado para ser utilizado como molde, éste está torneado por miembros del equipo en aluminio 2030 T4 (se puede ver el plano de fabricación en el plano 2 del anexo de planos).

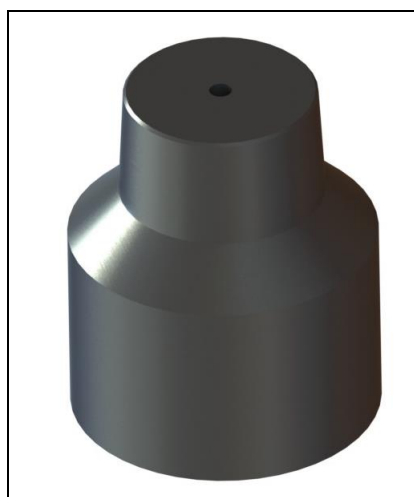
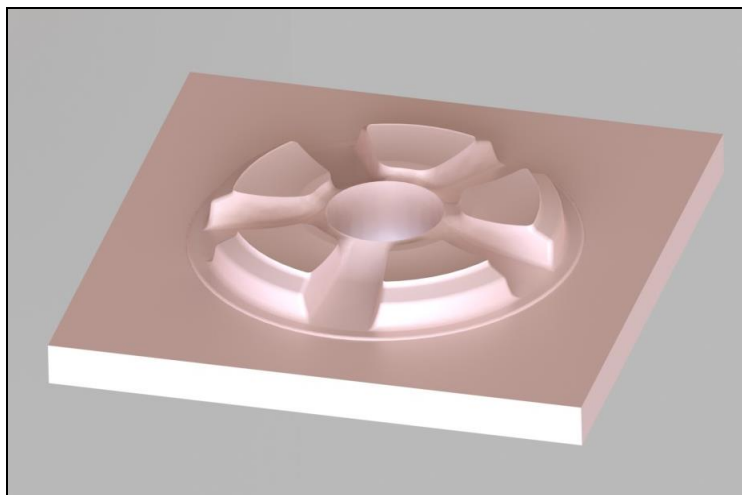
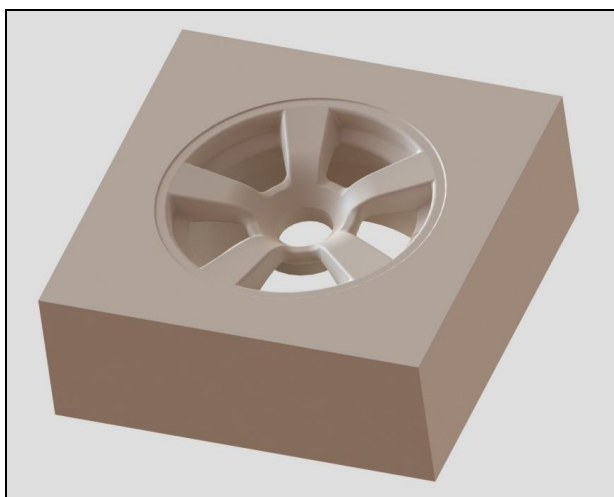


Imagen 7.1. De arriba a abajo: render del modelo principal, render del modelo auxiliar y render del modelo central.

Los tres modelos se ensamblan formando uno solo.

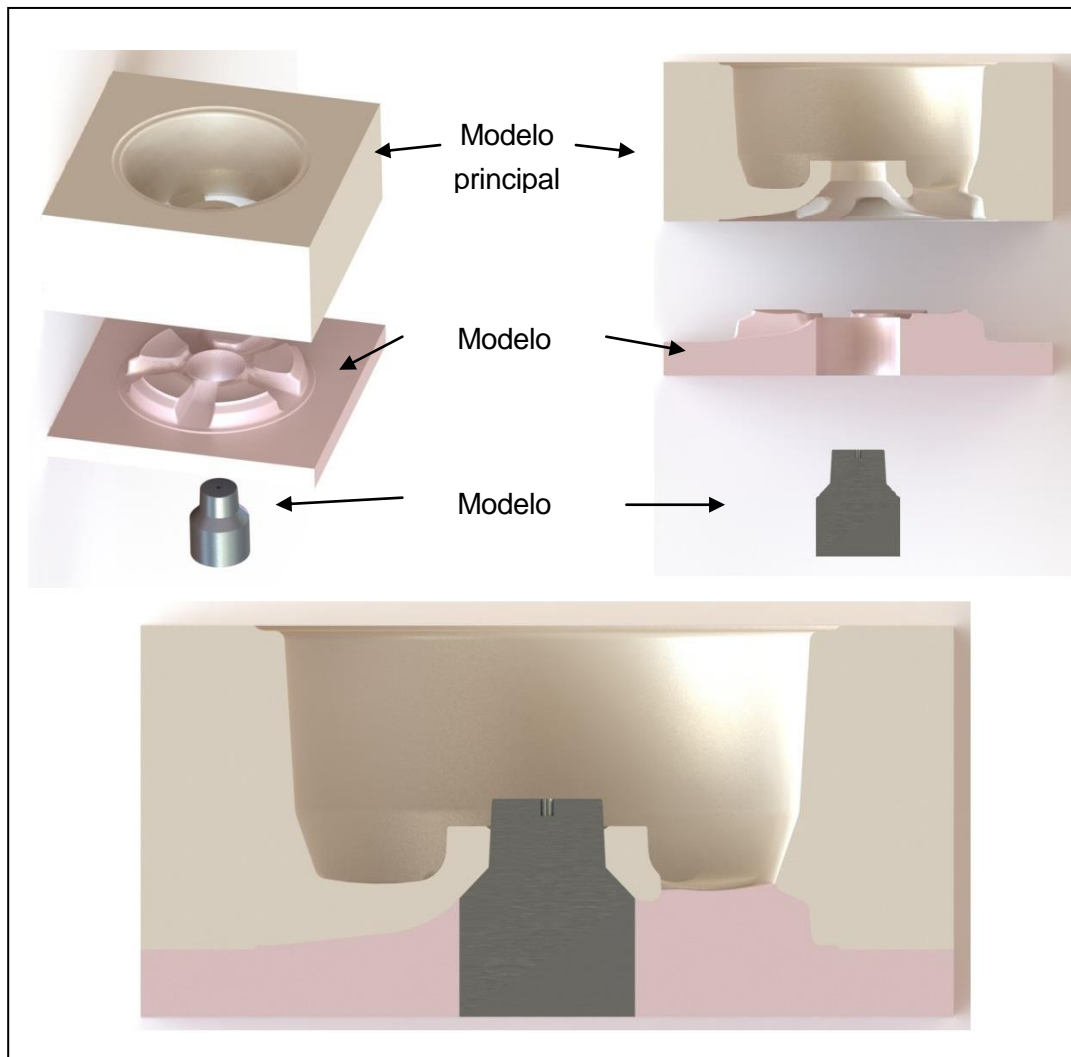


Imagen 7.2. Conjunto de los modelos y su ensamblaje

De estos modelos se fabricarán los dos moldes en fibra de carbono. El tercer molde como se ha comentado antes se reutiliza el mismo modelo central, pero pasaremos a llamarle molde central cuando se esté utilizando como molde. Este molde central es importante porque ayudará a laminar la parte del monolítico de fibra de carbono donde se aprieta la mono tuerca.

Al utilizar el mismo modelo principal para la fabricación de los dos moldes, éste debe tener una línea de partición por el que se desmoldea. La línea de partición se ha diseñado pensada para que se encuentre situada en la parte inferior de los radios. De esta manera es la forma más sencilla de conseguir unos buenos ángulos de salida.

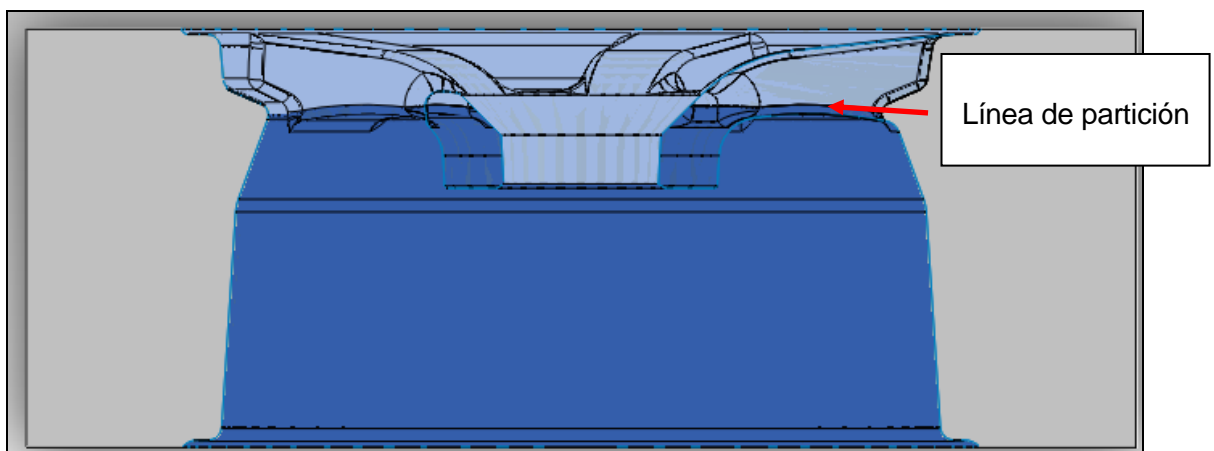


Imagen 7.3. Render de la llanta con el detalle de la línea de partición de los dos moldes

De esta forma tendremos el molde inferior, que será el molde correspondiente a la parte de azul oscuro de la Imagen 7.3 y el molde superior que corresponde a la zona azul claro.



Imagen 7.4. Render del conjunto de moldes

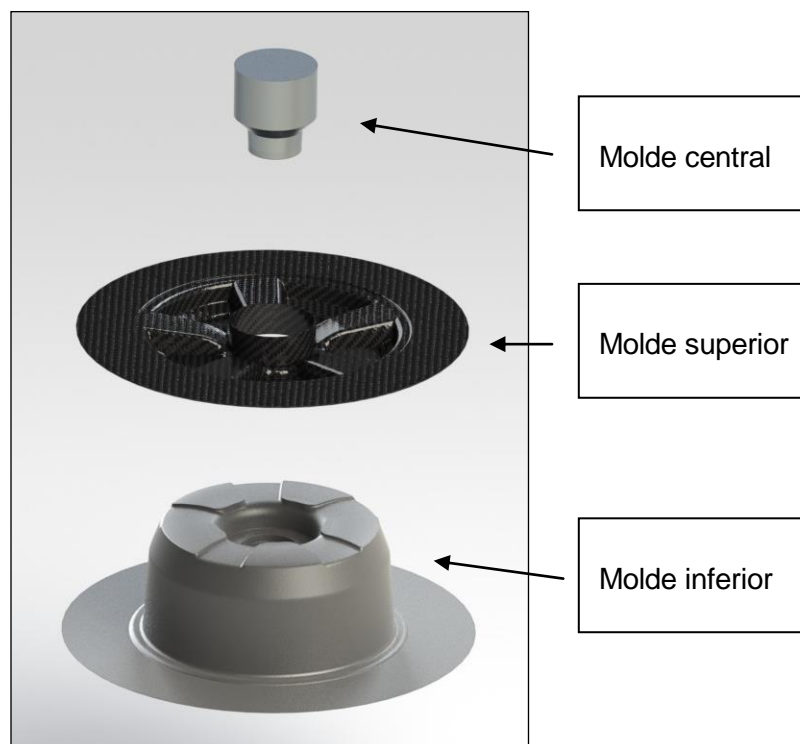


Imagen 7.5. Ensamblaje de los tres moldes

Los moldes son interiores porque interesa que las caras de la llanta que se encuentren en contacto con el neumático tengan una cierta rugosidad de cara a tener una mayor fricción entre la llanta y el neumático. Ya que la cara de fibra que este en contacto con los moldes quedará totalmente lisa y la rugosidad será prácticamente nula.

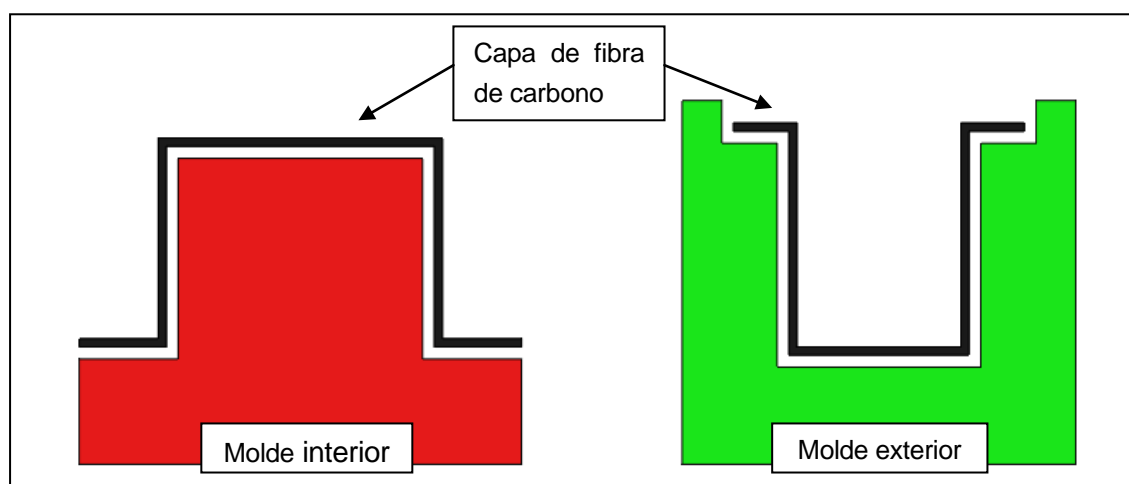


Imagen 7.6. Explicación de un molde interior y un molde exterior

Teniendo esto en cuenta podríamos decir que el modelo principal actúa de molde exterior y el molde principal actúa de molde interior. Escoger un molde interior o exterior dependerá de donde se quiera que se encuentre la cara lisa de la pieza de fibra de carbono.

Como se puede observar en la figura siguiente los ángulos de salida del modelo principal permite la fácil extracción de los moldes, que a la vez estos tendrán para la fácil extracción de la llanta final. La parte pintada de color verde pertenece a las caras con ángulos de salida positivos, correspondientes al molde inferior, y las caras pintadas de color rojo pertenecen a las caras con ángulos de salida negativos pertenecientes al molde superior.

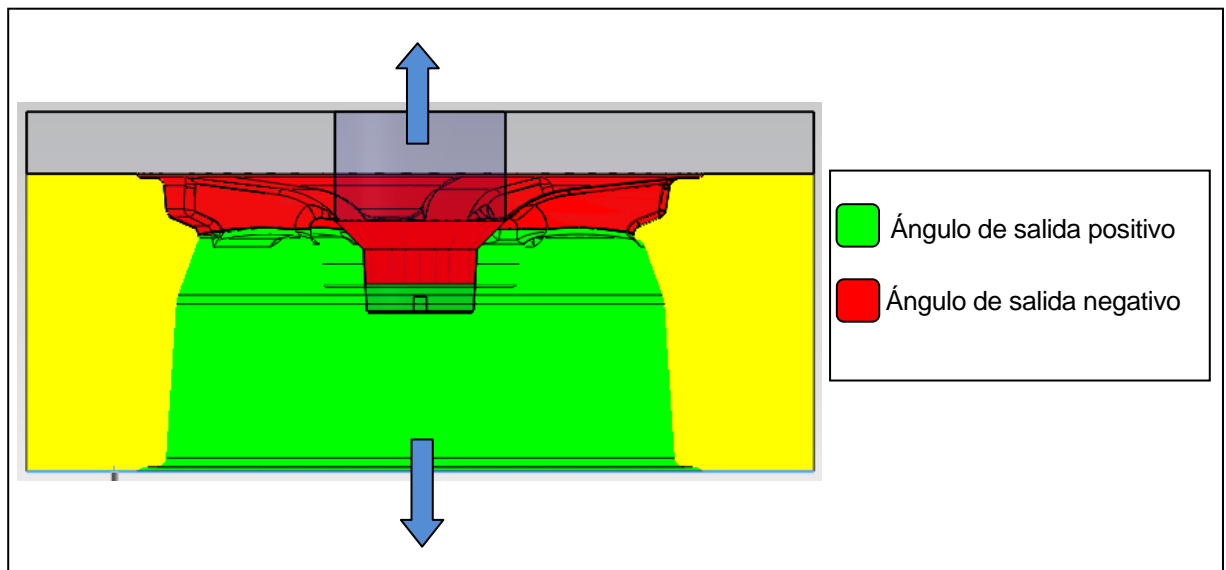


Imagen 7.7. Ángulos de salida positivos y negativos

Para reducir costes se ha estudiado un sistema de modelos que se utilizarán para la fabricación de distintos moldes. El modelo principal será utilizado tanto para hacer el molde inferior como el molde superior. El modelo central se utilizará tanto como modelo para la fabricación de los moldes como de molde para la fabricación de la pieza y el molde auxiliar es el único modelo que será utilizado únicamente una vez para la laminación del modelo inferior.

Los pasos de laminación y como interviene cada molde en su proceso esta explicado en el apartado **8.2 Proceso de laminado de los moldes**.

En el diseño de los moldes también se ha de tener en cuenta que al fabricarlos de esta manera el extremo de los radios no quedarán tapados, por lo que si se dejara así el flanco del neumático podría no descansar bien sobre la llanta ocasionando problemas como la pérdida de estanqueidad. Por lo que en el diseño tanto de la llanta como de los moldes se ha tenido en cuenta este factor. Para solucionar este problema se ha diseñado la llanta de

tal manera que el ancho del radio es inferior al ancho de la zona que hay entre radios. De esta manera se podrá laminar a posteriori únicamente en la zona roja de Imagen 7.7 y con este parche tapar el agujero. El procedimiento se describe en detalle en el apartado **9.4.Acabados finales.**

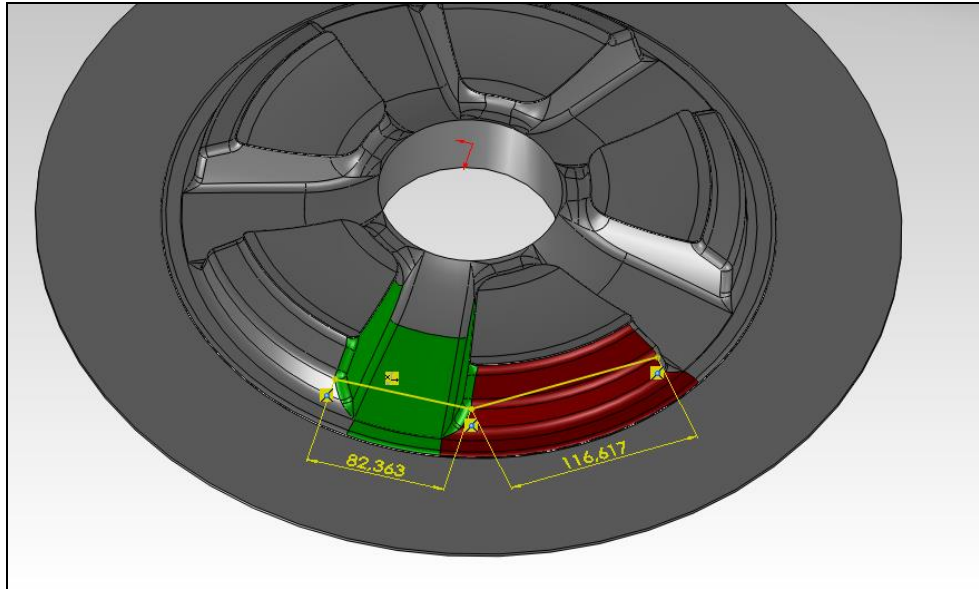


Imagen 7.8. Detalle de las dimensiones de los agujeros de los radios

Gracias a la utilización de un molde para la fabricación del otro, no solo ahorramos económicamente, sino que se consigue un perfecto acoplamiento entre los moldes.

7.2. Simulaciones estructurales

Para dimensionar la llanta se realizan simulaciones de elementos finitos con el programa Abaqus, recomendado por la empresa Mira Tecnología durante el diseño del CAT04.

El objetivo de estas simulaciones es determinar el número de capas de fibra de carbono con que se laminará la llanta y las orientaciones de estas. Para ello observaremos las deformaciones que presenta la llanta bajo unas determinadas fuerzas. El criterio para decidir el número de capas y sus orientaciones más óptimas es tener en la llanta unos desplazamientos inferiores de los 2,5mm. Este valor de desplazamiento de las fibras es un valor recomendado por NEXUS con el cual las fibras pueden trabajar sin romperse. Por otro lado, con estos desplazamientos el neumático y la llanta seguirán trabajando correctamente. Reducir este desplazamiento implicaría el aumento de fibras y por consiguiente aumentar el peso de la llanta. Por esta razón se consideran aceptables estos

2,5mm. La orientación de las fibras es importante ya que define las direcciones principales de las tensiones máximas admisibles, por lo tanto ofrecerán más resistencia en la dirección de las fibras.

También se mirara que las tensiones máximas no superen las tensiones máximas admisible de la fibra de carbono.

El mallado de la pieza se ha realizado mediante un pre-procesador llamado ANSA, el cual permite tener un gran control sobre la malla y sus elementos. La malla se crea con una longitud media de 4.5mm. La cantidad máxima de trías se limita a un 10% del total de elementos.

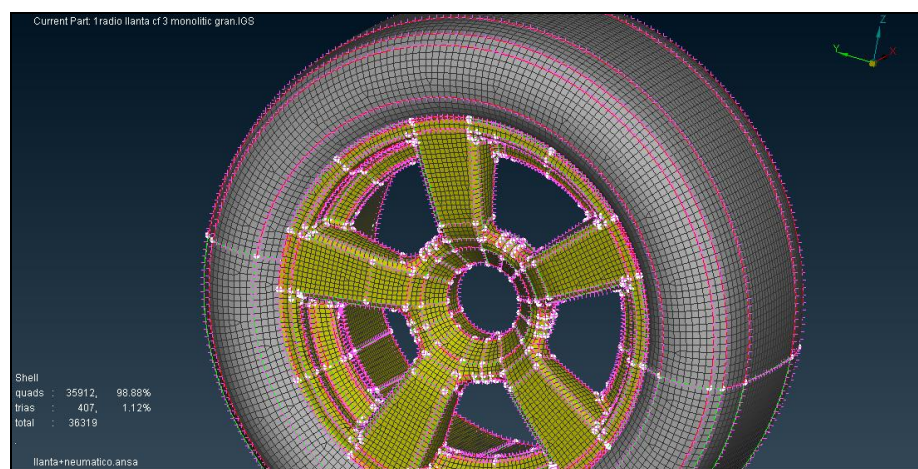


Imagen 7.9. Imagen del programa ANSA con el mallado de la llanta

En los tejidos equilibrados, como las fibras, donde el tejido plano está formado por hebras entrecruzadas vertical y horizontalmente las características son idénticas en los dos ejes, por lo tanto es suficiente sabiendo el módulo elástico, el módulo a cizalla, el coeficiente de Poisson, la resistencia a tracción, la resistencia a compresión y la resistencia a cizalla.

El proceso de determinación del número de capas es un proceso iterativo donde se ha partido de una llanta con 10 capas en toda la pieza con una distribución de fibras alternando el ángulo de trenzado 0° y 45° excepto en los radios ya que es un claro ejemplo donde las fuerzas se transmiten en la dirección del radio. Por lo tanto tiene sentido que se coloquen más capas en la dirección de los esfuerzos que en otra dirección, se estudiará el caso en que se alternarán dos capas en la dirección de los radios con una capa a 45° .

Con las simulaciones se ha ido ajustando el número de capas en todas las zonas de la llanta.

7.2.1. Cálculo de fuerzas

Para poder dimensionar el número de capas de fibra de carbono que se necesitan para su fabricación es esencial conocer la distribución de fuerzas que actúan sobre el neumático del monoplaza.

Para poder afrontar este objetivo es necesario estudiar el repartimiento de fuerzas normales en función de las aceleraciones longitudinal y lateral del monoplaza.

Los parámetros que intervienen en la distribución de fuerzas normales son fundamentalmente geométricos. Los primeros parámetros que se han definido durante la etapa de diseño cinemático del vehículo son la distancia entre ejes y la vía delantera y trasera. Estas distancias vienen limitadas por la normativa de la FSAE y las dimensiones de los diversos circuitos y de las distintas pruebas dinámicas.

Por lo que refiere a la distribución del centro de masas se ha obtenido del estudio realizado por la sección de *Package*, ya que este parámetro depende de todos los subsistemas que componen el monoplaza. Para la estimación de la masa se considera el vehículo completo en orden de marcha más el piloto con todo su equipamiento.

La Tabla 7.1 recoge estos valores más representativos del CAT06e.

Batalla	L	1535	mm
Vía delantera	V_f	1095	mm
Vía trasera	V_r	1065	mm
Altura del centro de gravedad	h_{cdm}	280	mm
Masa del monoplaza en orden de marcha	m	400	Kg
Distribución de masas delantero	$\%m_f$	48	%
Distribución de masas trasero	$\%m_r$	52	%

Tabla 7.1. Parámetros geométricos y de masa del CAT06e

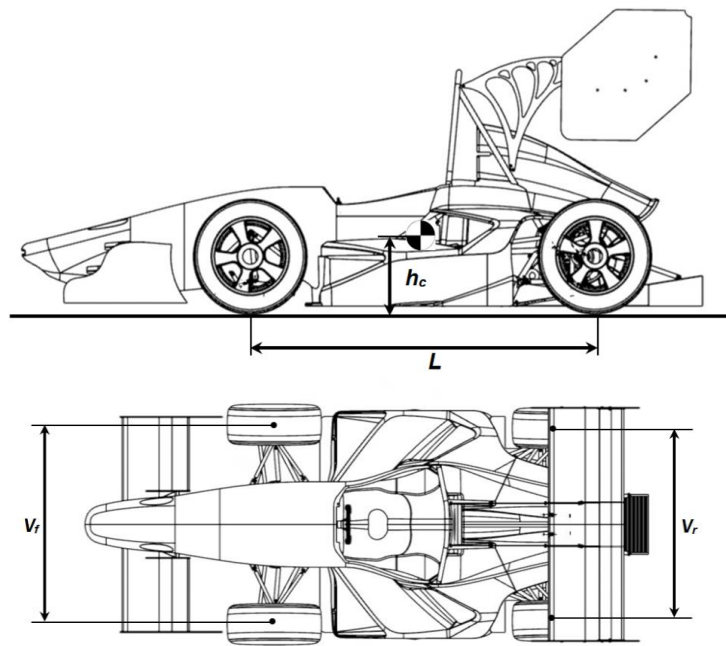


Imagen 7.10. Vista horizontal y vertical del CAT06e

7.2.2. Hipótesis de cálculo

El cálculo exhaustivo de la distribución de normales en los neumáticos no es el objetivo principal de este proyecto por lo que no se calcula la normal de cada neumático para cada situación de carrera. Por este motivo se ha considerado las siguientes hipótesis con el objetivo de hacer el estudio más sencillo.

Para su cálculo se considera únicamente la situación con la normal más elevada, que es el caso de paso por curva pura en el eje trasero (menor vía, 1065mm, y mayor porcentaje de peso en el eje, un 52% de la masa).

Posteriormente se considera con esta normal como si se tratase de una situación de curva con frenada, en la que aparecen fuerzas longitudinales y laterales en el neumático.

Los cálculos se detallan en el Anexo H.

7.2.3. Caracterización de los materiales

Neumático:

El neumático está hecho de caucho y en el interior contiene aire a una determinada presión comportándose como un muelle cuando se le aplica una fuerza.

El siguiente gráfico (Fig. 7.1) nos indica la deformación del neumático para una presión y una fuerza normal determinada. Estos datos de Hoosier nos ayudan a caracterizar el módulo de Young del neumático en la simulación para que tenga las mismas deformaciones que en la realidad.

Por lo tanto el neumático lo definimos como un material elástico y tipo isotrópico con un módulo de Young de 58,66 y el coeficiente de Poisson típico de los cauchos de 0,5.

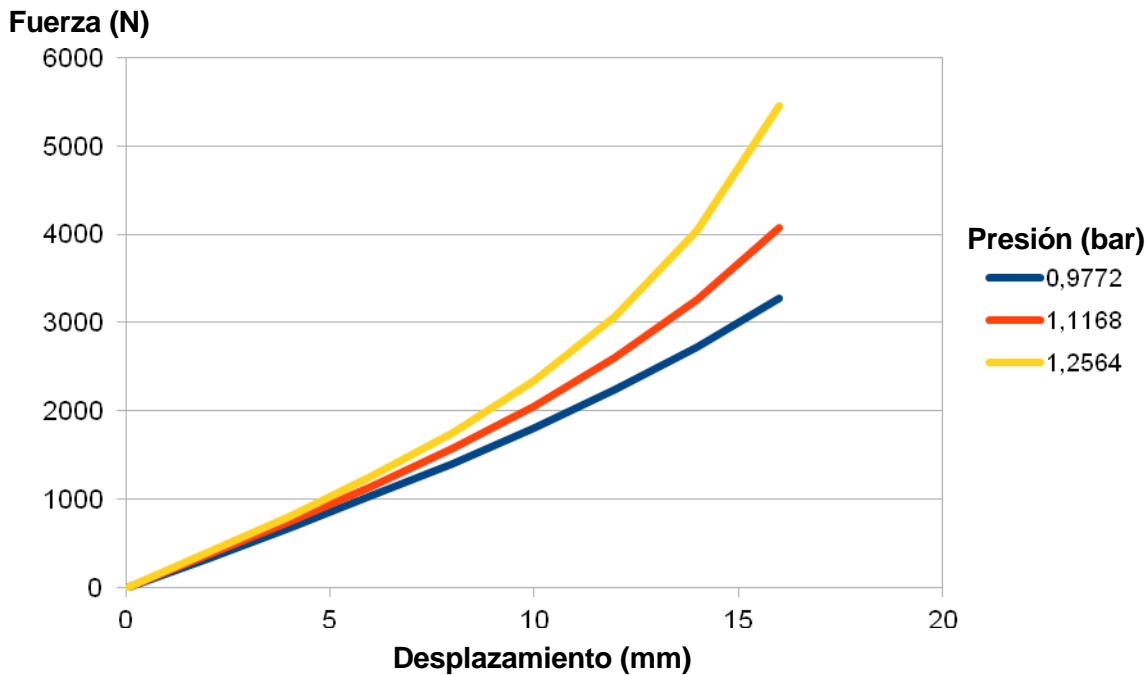


Fig. 7.1. Gráfico fuerza desplazamiento de los neumáticos en función de la presión

- Fibra de carbono:

La fibra de carbono se define como un material elástico tipo lámina con las constantes que indica el fabricante en la ficha técnica del material (anexo M). Para definir un tipo lámina es necesaria introducir en Abaqus el módulo de Young en ambas direcciones (69,1 GPa), módulo de Young a cizalla (59 MPa), y el coeficiente de Poisson (0,3).

El tipo lámina da la posibilidad de definir el número de capas de fibra que se le pondrán, la orientación que tendrán y el grosor de éstas después del curado (en este caso 0,3mm). También da la posibilidad de definir un núcleo entre capas, pero en este caso no se utilizara ya que no se ha pensado la utilización de ningún tipo de núcleo entre capas.

Para esto se ha definido las siguientes particiones de la pieza. En cada una de estas tendremos diferentes números de capas y diferentes orientaciones. Se iterará con el número de capas y sus orientaciones hasta obtener unos resultados óptimos.

Se empieza a iterar con una distribución de diez capas en cada partición con una orientación de la trama estándar de 45 / -45 / 0 / 90 hasta llenar las 10 capas. En caso de haber deformaciones mayores a 2,5mm se aumentara el número de capas y en caso contrario se reducirá el número.

La dirección de la trama correspondiente al ángulo de 0 grados está orientada en la misma a la dirección de los radios.

Como se puede ver en la Imagen 7.11 se puede ver el número de capas y la orientación de la trama de un radio en la última iteración.

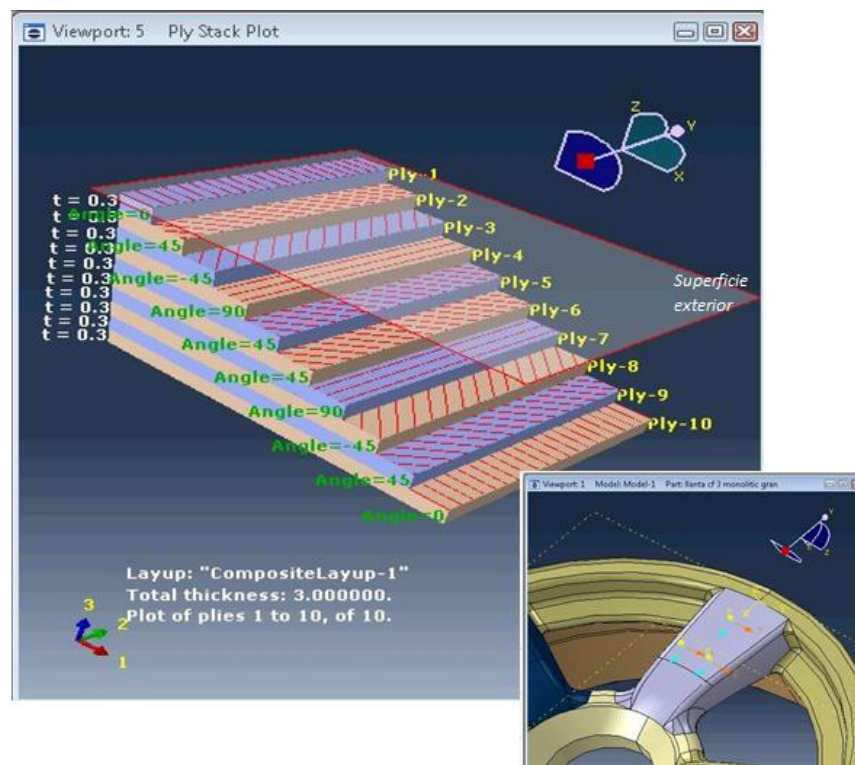


Imagen 7.11. Número de capas y su orientación en un radio.

La parte del núcleo central corresponde a la parte del monolítico de fibra de carbono (se rellena por completo con fibra) y se caracteriza como un sólido.

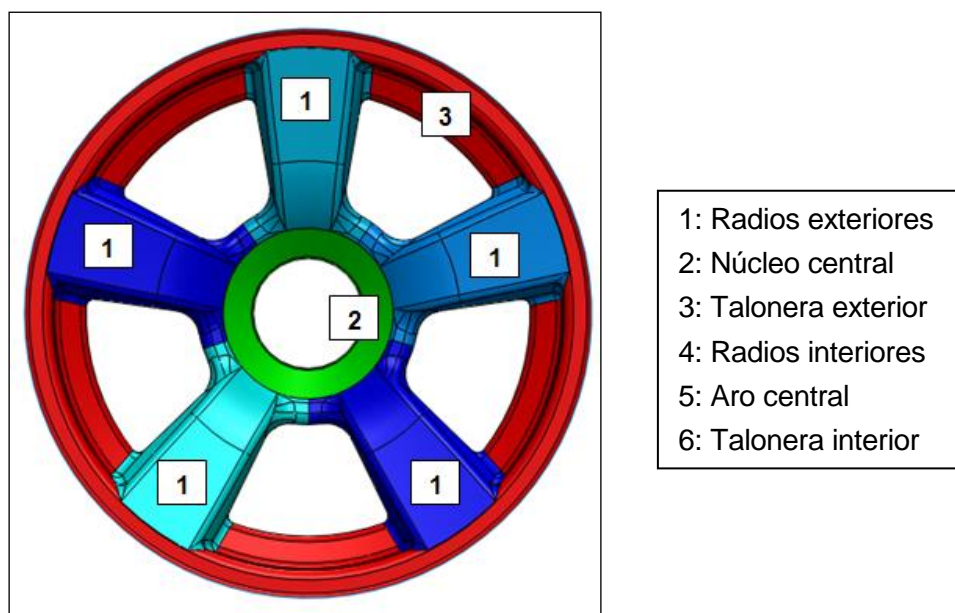


Imagen 7.12. Distribución de capas de la cara exterior de la llanta

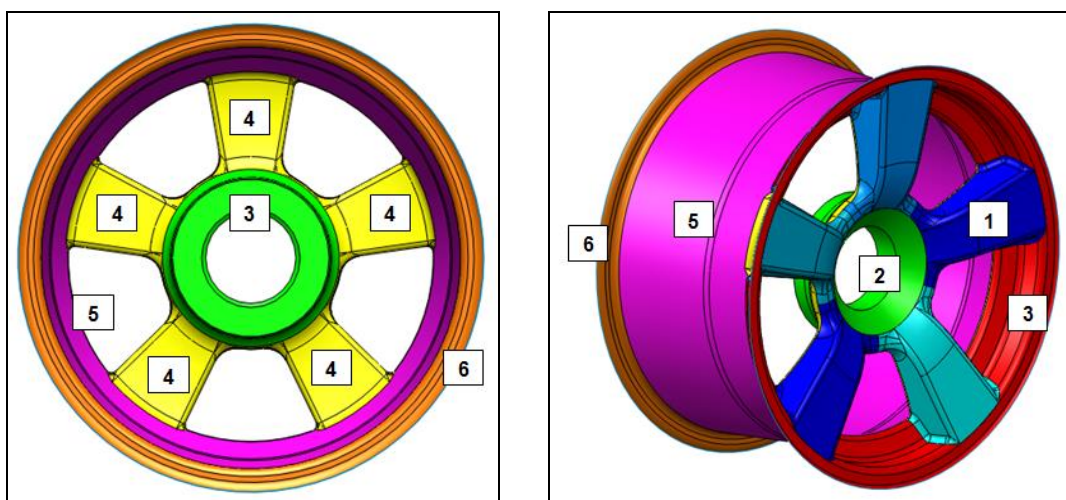


Imagen 7.13. Distribución de capas de la cara interior y lateral de la llanta

7.2.4. Condiciones de contorno

Se fija por el centro (se restringe los desplazamientos y rotaciones en los ejes X, Y y Z), por una lado la cara donde se apoya la mono tuerca, y por el otro por la cara de contacto con el buje.

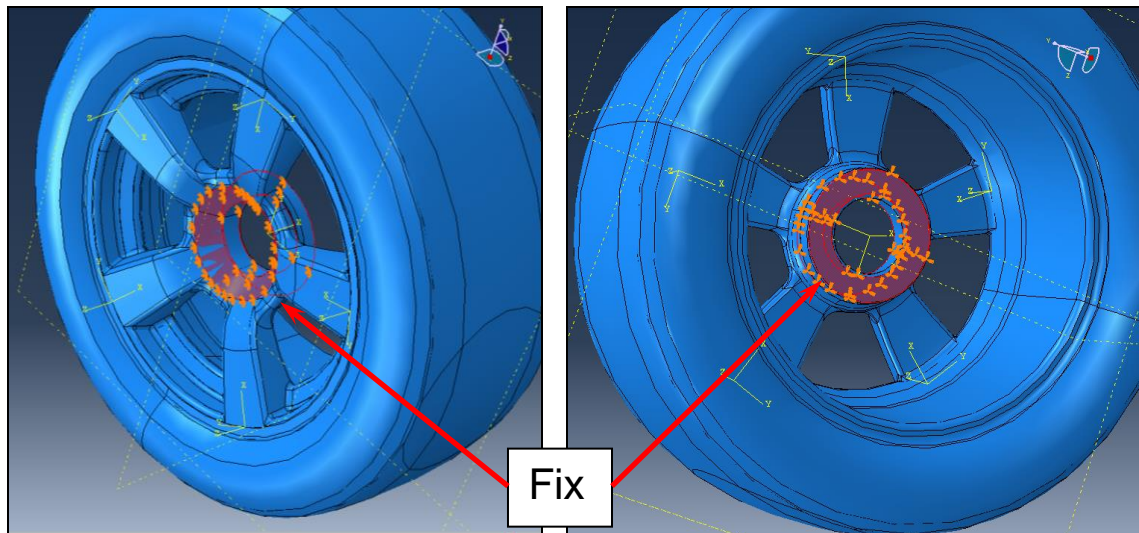


Imagen 7.14. Condiciones de contorno: Restricción de movimientos

Las fuerzas (normal, lateral y longitudinal) se aplican en el area de la huella del neumático que corresponde a la base que esta en contacto con el asfalto. Los valores de las fuerzas aplicadas son las que se pueden ver en la Imagen 7.15. Se ha hecho diferentes simulaciones variando la posición de la huella para encontrar en que situación és la más crítica. Se varía la posición entre justamente debajo del radio y entre los radios.

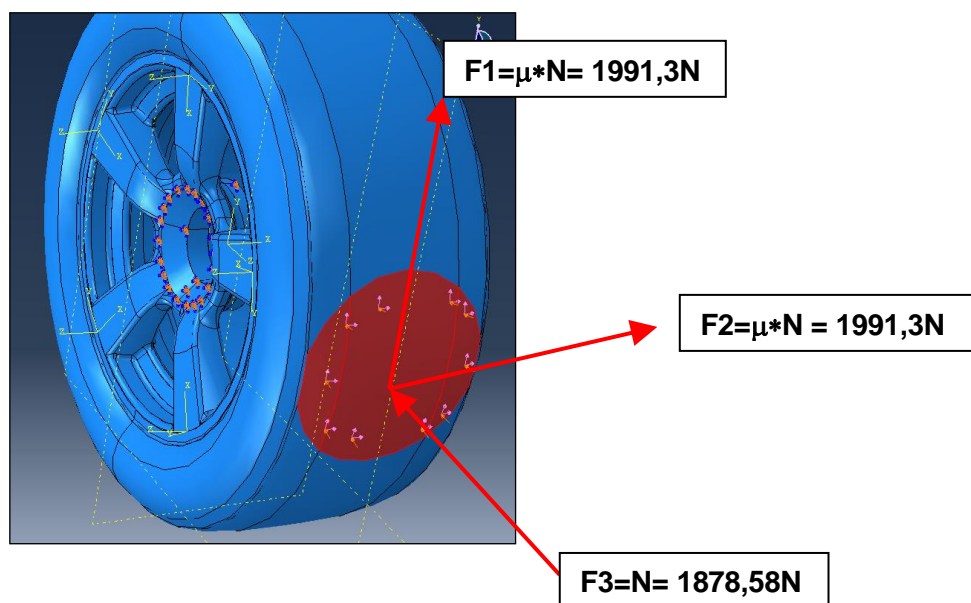


Imagen 7.15. Condiciones de contorno: Fuerzas

7.2.5. Resultados

Con una serie de iteraciones se llega a la distribución de capas definitiva con los ángulos de la trama siguientes (la capa 1 es la capa exterior, es decir la que está en contacto con el molde o la primera que se coloca):

Capas	Molde superior		Molde inferior		
	Radios exteriores (1)	Talonera exterior (3)	Radio interior (4)	Aro central (5)	Talonera interior (6)
1	0	0	0	0	-
2	45	90	45	-	0
3	-45	45	-45	90	-
4	90	-45	90	-	90
5	45	0	45	0	-
6	45	90	45	-	0
7	90	45	90	0	-
8	-45	-45	-45	-	90
9	45	0	45	90	-
10	0	90	0	-	90
11	-	-	-	0	-
12	-	-	-	-	0
13	-	-	-	-	90
14	-	-	-	-	0
Estas capas se colocarán después de tapar los agujeros de los radios					
15	-	0	-	0	0
16	-	-	-	-	0
17	-	90	-	90	90
18	-	-	-	-	0
19	-	0	-	0	0

Tabla 7.2. Distribución de capes y su orientación

Las capas que se colocan después del horno autoclave para tapar los agujeros se colocan como si fueran una única partición (una única capa para las tres particiones), con lo que las tres particiones tienen los mismos ángulos, con las fibras a ± 45 grados (la trama a 0 y 90). No se alterna como anteriormente +45, -45, 0, 90 porque las capas se adaptan mucho mejor con las fibras a ± 45 grados que a 0 / 90.

Para llegar a estas conclusiones se observa los desplazamientos que tiene la llanta. En la Imagen 7.16 se observa la primera iteración con 10 capas y las fibras orientadas alternadamente a $+45$, -45 , 0 , 90 . No se puede dar por óptimo ya que los desplazamientos son entorno a los 3mm.

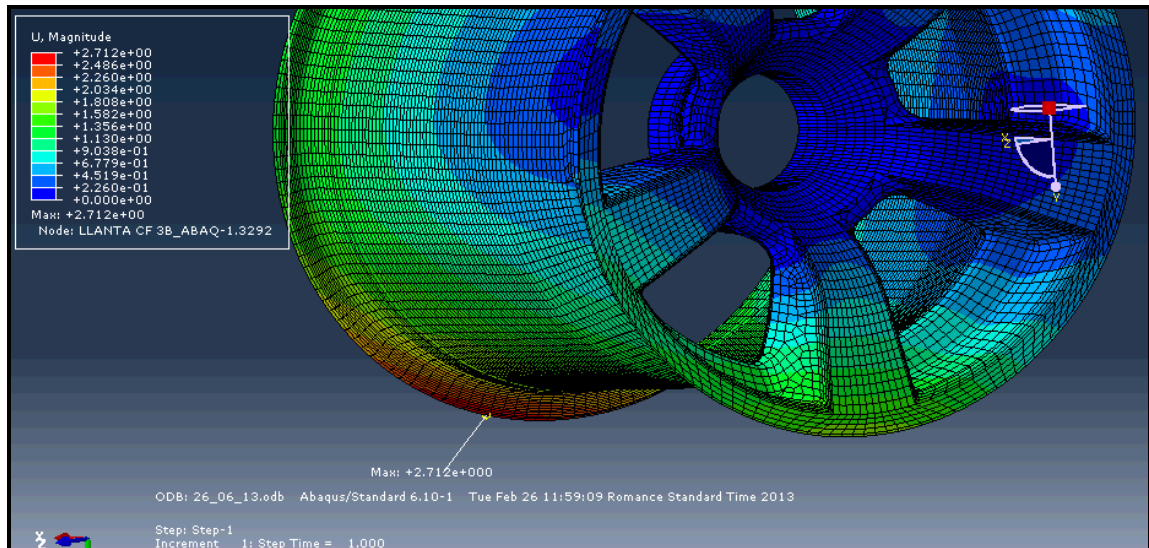


Imagen 7.16. Desplazamiento de la primera iteración

Modificando el número de capas y sus orientaciones se llega a la configuración de la Tabla 7.2. Como se observa en la Imagen 7.17 los desplazamientos máximos se encuentran en la talonera interior con un valor de 2,5mm. La parte de color rojo corresponde a desplazamientos del orden de los 2,5 mm por lo que se da por buena la distribución de capas anterior.

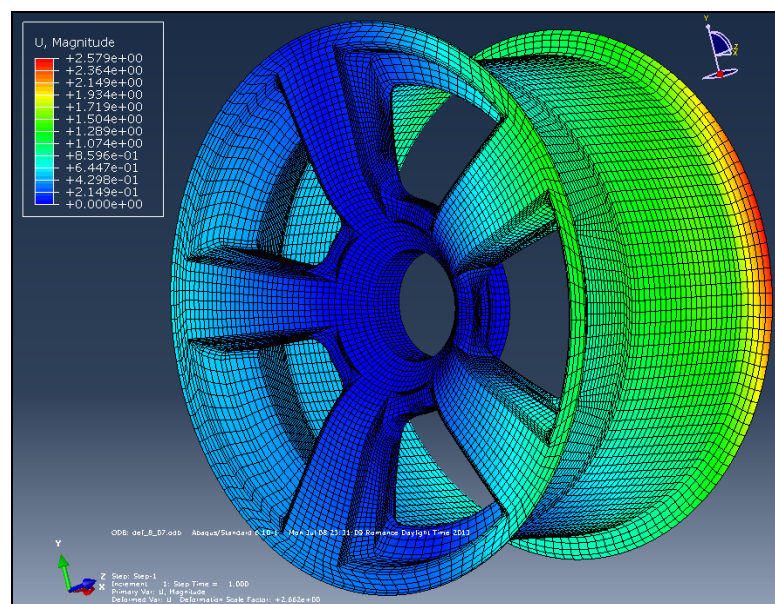


Imagen 7.17. Desplazamientos en la llanta

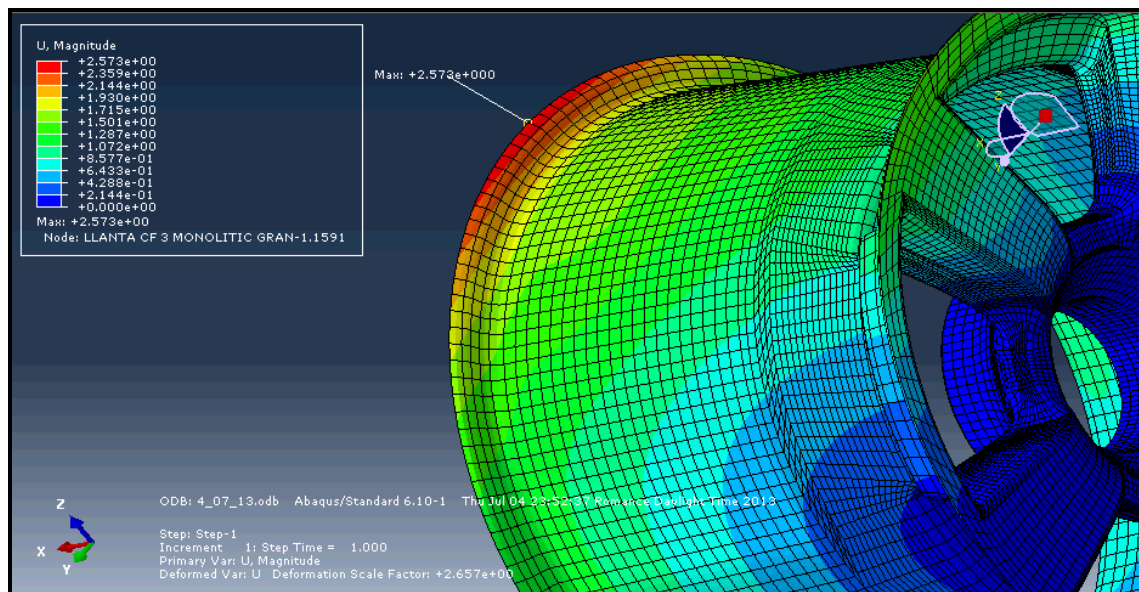


Imagen 7.18. Detalle de los desplazamientos

Todo y que las tensiones no se usan como criterio de diseño en materiales compuestos podemos observar que las tensiones de Von Mises máximas se encuentran en la parte mas exterior del radio como se puede ver en la Imagen 7.19 con un valor máximo de 288 MPa, por debajo de las tensiones máximas admisibles de la fibra de carbono (420MPa).

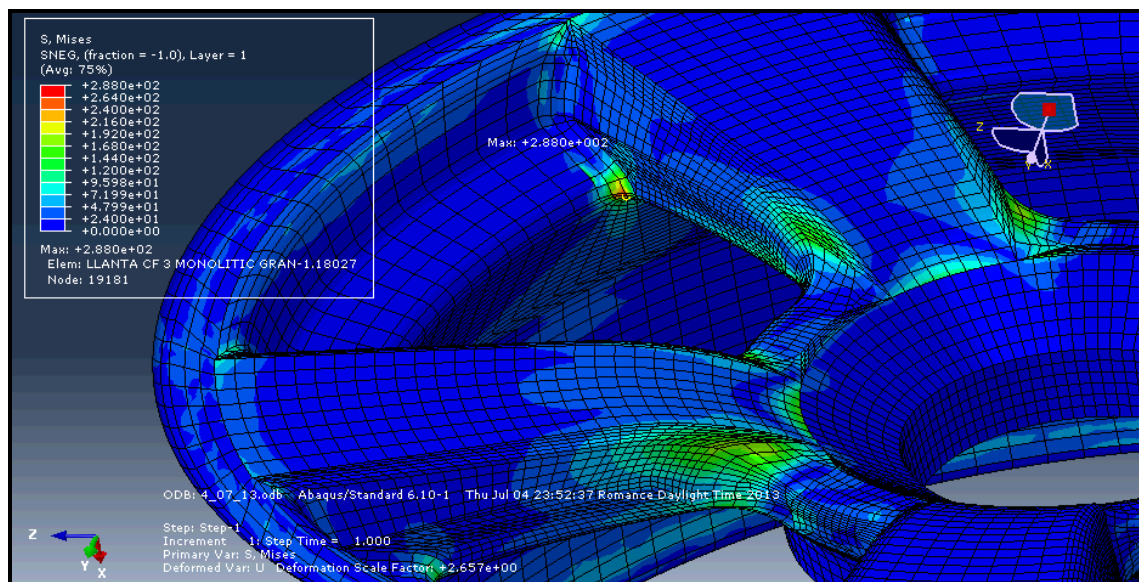


Imagen 7.19. Tensiones en la llanta

8. Fabricación de los moldes

8.1. Preparación de los modelos

Una vez se tienen los moldes fresados en se han de preparar para la laminación de los modelos.



Imagen 8.1. Molde auxiliar



Imagen 8.2. Molde principal

Como el primer molde se ha de laminar con los tres modelos encajados lo primero que se debe comprobar es que encajen unos dentro de otros a la perfección. Como no es así debido a las tolerancias del mecanizado, se debe retocar el modelo auxiliar. Únicamente se debe retocar el modelo auxiliar ya que el modelo principal sirve para la laminación de los dos moldes de fibra de carbono.

Como no es fácil observar donde impide que los dos modelos se acoplen se decide rebajar todas las paredes que encajan dentro del modelo principal. Esto hace que haya un pequeño gap entre los moldes.

Este problema tiene fácil solución. Para rellenar este gap se utiliza el adhesivo epoxy bicomponente de la marca AXSON A145 (se puede ver la ficha técnica en el anexo M). Para que el adhesivo se adhiera al molde auxiliar y no al molde principal se le debe dar 4 capas de cera al molde principal.

La aplicación de la cera consiste en poner la cera con un trapo, esparcirla homogéneamente por todo el modelo, esperar 20 minutos y pulir la cera sobrante.

Una vez se haya acabado la última capa de cera se juntan los modelos y se rellena el gap con el adhesivo. Se procura que no queden burbujas de aire dentro del adhesivo añadido.

Rellenados los huecos se espera a que el adhesivo quede ligeramente sólido para separar los modelos. Con un cúter se retira el adhesivo sobrante. Si este proceso se realiza antes de que el adhesivo solidifique totalmente resultara mucho más sencillo.



Imagen 8.3. Molde auxiliar con el adhesivo bicomponente de AXON



Imagen 8.4. Detalle del molde auxiliar con el adhesivo bicomponente de AXON



Imagen 8.5. Vista inferior de los tres modelos ensamblados



Imagen 8.6. Detalle de los modelos ensamblados con el adhesivo bicomponente

De esta manera los moldes encajan perfectamente y al laminar quedarán marcadas las esquinas a la perfección. Es importantísimo que marque bien las esquinas de cara a la laminación de la pieza final sobre los moldes, ya que cuando se junten los moldes tendrán que encajar por un lado las caras de un molde con las caras del otro para que parezca una pared continua.

Ahora se tiene el molde para empezar el proceso de laminado. Se juntan los modelos y se aseguran con unas mordazas para evitar que al moverlo se separe alguna de las tres partes.



Imagen 8.7. Modelos ensamblados y asegurados con mordazas

8.2. Proceso de laminado de los moldes

La técnica de laminado que ahora se va a explicar es la laminación por infusión, anteriormente escogida para la fabricación de los moldes.

Primero se hará una breve explicación de los pasos a seguir en la fabricación de los moldes y los modelos que se utilizan en cada paso. Posteriormente se detallará el proceso de laminado por infusión.

8.2.1. Fases de laminación de los moldes

Fabricación del molde inferior: es el primer molde que se lamina. Para ello se ensamblan los tres modelos. Una vez ensamblados se lamina la parte inferior del molde.

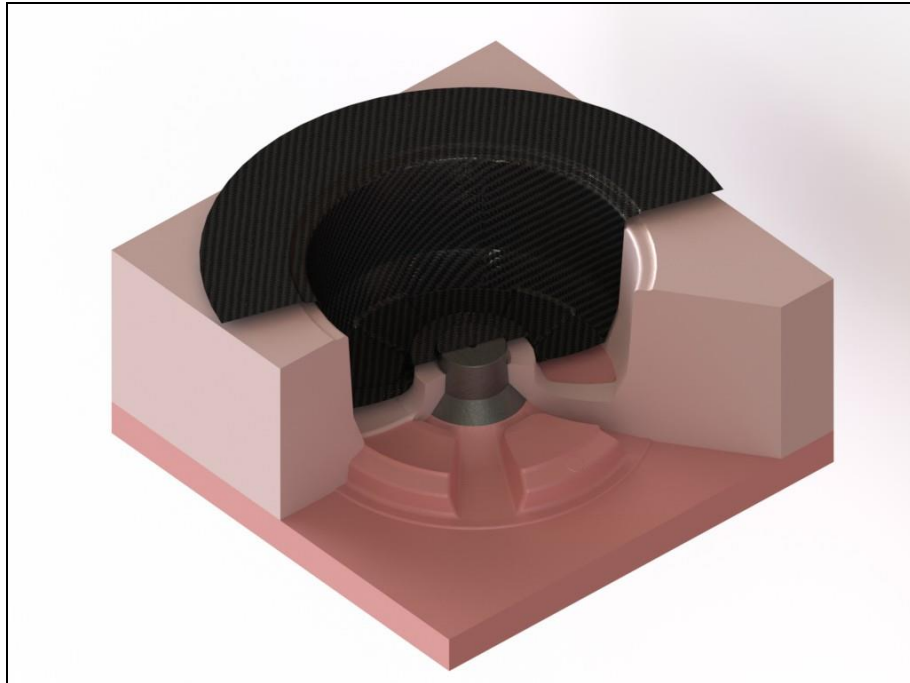


Imagen 8.8. Render de la laminación del molde inferior

Molde superior: es el segundo molde que se lamina. Para su laminación es necesaria la utilización del primer molde, como si se tratara del modelo auxiliar utilizado para la laminación del primer molde.

De esta manera una vez esté el molde inferior laminado, se quitará el modelo auxiliar y se laminará el molde superior con el molde inferior acoplado.

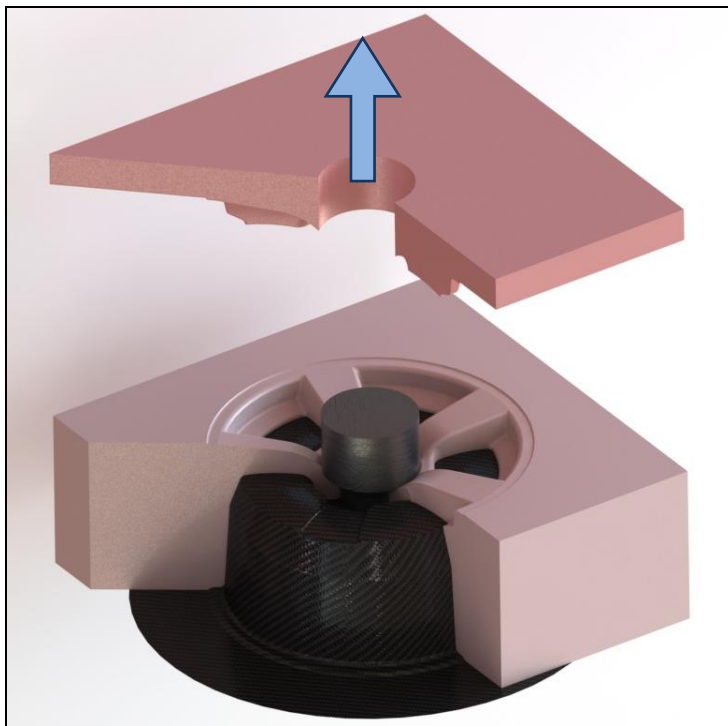


Imagen 8.9. Render de la extracción del modelo auxiliar para la laminación del molde superior

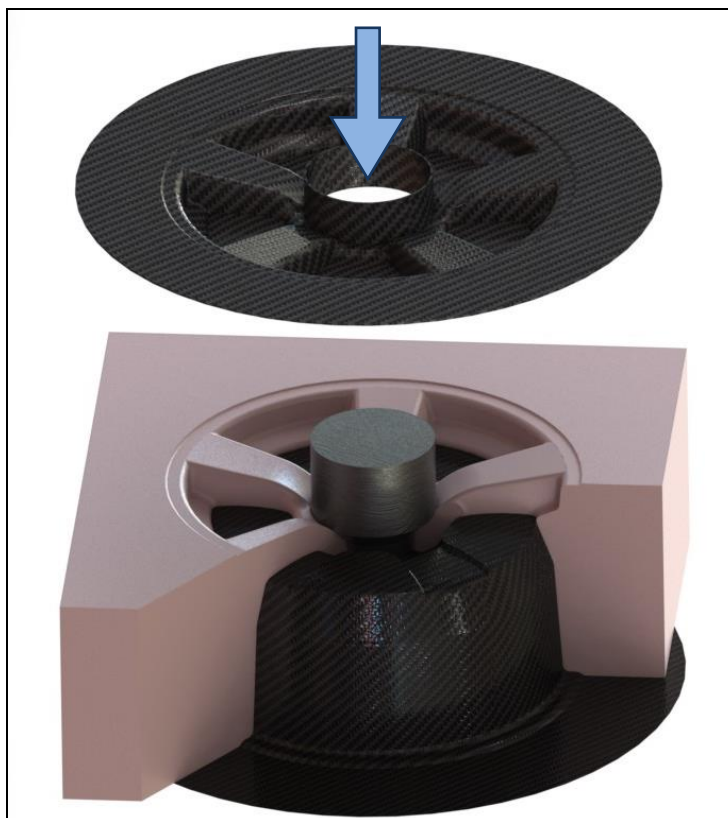


Imagen 8.10. Render de la laminación del molde superior

Como se ha dicho en el tema anterior, al laminar el segundo molde encima del primero, quedarán los dos moldes perfectamente adaptados el uno al otro.

Con los dos moldes hechos y la utilización del modelo central ya se podría empezar la fabricación de la pieza final.



Imagen 8.11. Conjunto de moldes finalizados



Imagen 8.12. Moldes ensamblados

8.2.2. Laminación del primer molde

Explicado esto se pasa a explicar la laminación mediante infusión del molde inferior. El proceso de laminado del molde superior se hará siguiendo el mismo procedimiento

Antes de ensamblar el conjunto de modelos lo primero que se ha de hacer es tratar el modelo con un tratamiento desmoldeante, entre 5 o 6 capas de cera. Posteriormente se le aplica el *gel coat* de epoxy RESOLCOAT 2060 GC ALU con una concentración del 13% de catalizador 2061s de la marca RESOLTECH.

Antes de que se seque el *gel coat* se le añade una tira de adhesivo epoxy A140 de la marca AXSON (se puede ver la ficha técnica en el anexo M) para reforzar bien las esquinas del molde, y como la fibra tiene un cierto grosor es muy probable, casi seguro, que si el ángulo de la esquina es demasiado agudo, al laminar la fibra podría no copiar bien ese ángulo, formando un redondeo que no interesa. De esta manera se asegura que las esquinas quedan con el ángulo bien definido y bien reforzado gracias al adhesivo.

El *gel coat* puede secarse a temperatura ambiente durante 4 horas o en el horno a 70°C durante 20 minutos.



Imagen 8.13. Secado del gel coat del molde inferior a temperatura ambiente

Una vez el *gel coat* está seco se empieza a laminar. Todas las capas de fibra que se colocan seguirán el patrón ISO +45 / -45 / 0 / 90. Para una mayor resistencia. Las capas se forman a partir de trozos más pequeños de fibra. Tanto la fibra de carbono como la fibra de vidrio se cortarán en pequeños trozos entre cuadrados y rectangulares, aproximadamente de unos 10cm de lado. Para la parte circular, excepcionalmente se cortaran trozos en forma circular, con el radio necesario para cubrir las superficies. Es importante por eso que las esquinas queden bien cubiertas por la fibra.

Primero se colocan 3 capas de fibra de vidrio, dos capas de un gramaje de 100 g/m² y una capa de un gramaje de 200 g/m². La fibra de vidrio se coloca utilizando la técnica de laminación por vía húmeda. Se colocan las tres capas de fibra de vidrio que se van ungiendo con resina epoxy con la ayuda de un pincel. Luego se pone una capa de *peel play* y se espera que cure.

Una vez haya curado lo siguiente es retirar el *peel play* y colocar las capas de fibra de carbono. Para que las fibras no se muevan mientras se manipula el molde y quede con la orientación que se desea se espolvorea las fibras con adhesivo en spray Airtac 2 (se puede ver la ficha técnica en el anexo M) y se colocan en el sitio deseado.

Se colocan un total de 9 capas de fibra de carbono, la primera de un gramaje de 200 g/m² y el resto de un gramaje de 600 g/m².



Imagen 8.14. Laminación de las primeras capas de fibra de carbono del molde inferior.



Imagen 8.15. Laminación de las capes fibras de carbono de gramaje de 600 g/m²

El siguiente paso es preparar el molde para realizar el vacío. Encima de la fibra de carbono se coloca una capa de film sangrador especial para infusión. El film sangrador se coloca para separar la pieza final de la manta de absorción y la bolsa de vacío, pero en el caso de la infusión sirve para separar la pieza de la malla de distribución, y evitar así que se enganche a la fibra ni la malla de distribución ni los canales de infusión.



Imagen 8.16. Colocación del film sangrador

Encima del film sangrador se coloca la malla de distribución. Esta malla se encarga de distribuir uniformemente la resina por toda la pieza.



Imagen 8.17. Colocación de la malla de distribución

Es importante que no se cubra toda la pieza con la malla. Se debe dejar un margen sin cubrir para que la resina se vaya frenando y se distribuya homogéneamente por toda la pieza llegando a todas las capas. Además, de esta manera también se evita que la resina entre en los conductos de aspiración taponando la salida del aire.



Imagen 8.18. Zona sin malla de distribución para el Frenado de la resina

El siguiente paso es colocar las líneas de aspiración. Estas líneas son las que se conectarán a la bomba de vacío y extraerán el aire del molde absorbiendo a la vez la resina.

Es importante estudiar bien el flujo de resina y la colocación de los conductos tanto de aspiración como de entrada de resina para garantizar que la resina se distribuya correctamente. Se decide instalarle un sistema de flujo radial. Se colocan cuatro trozos de tubos de aspiración conectados entre sí alrededor de toda la pieza, y el conducto de entrada de resina por la parte central de la pieza.

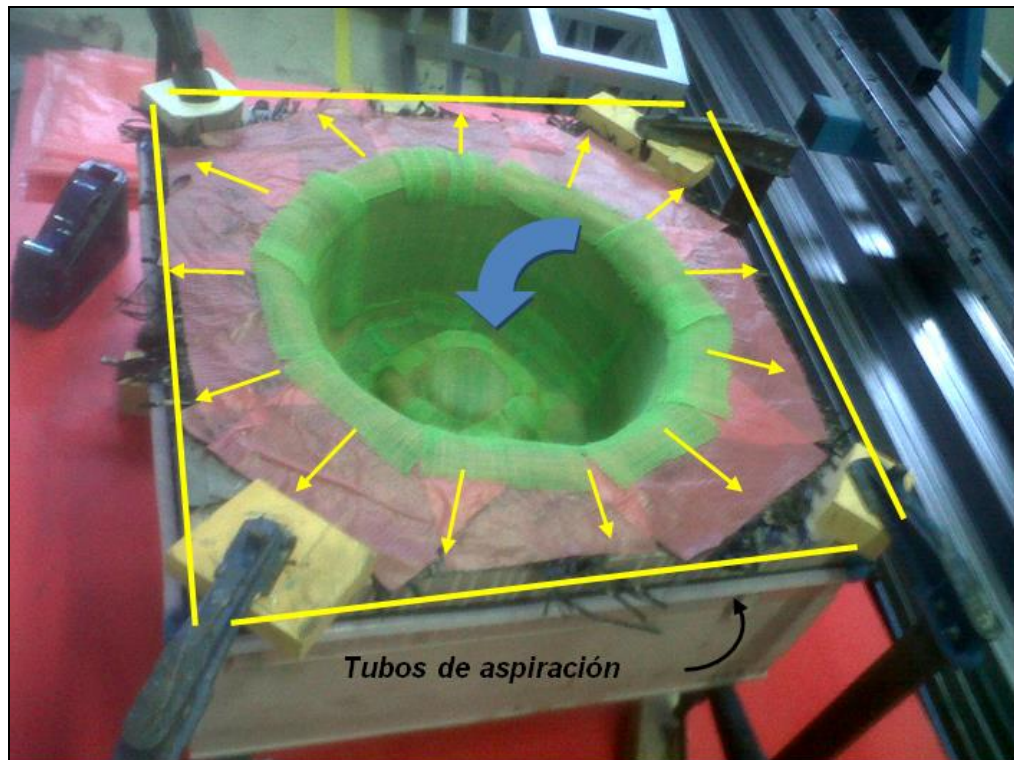


Imagen 8.19. Distribución de líneas de aspiración

Éstas se engancharan al modelo mediante *tacky tape* (masilla de cierre) o cinta de doble cara. En nuestro caso se utilizó *tacky tape* ya que no se disponía de cinta de doble cara.

Para unir los extremos de los tubos se utilizan unas 'L' para que se adapten bien a las esquinas del modelo. Para adaptar el tubo que va hacia la bomba de vacío se coloca una 'T' en medio de uno de los tubos. Las 'L' y las 'T' se aseguran con un trozo de cinta adhesiva para que el flujo de aire no se vea interrumpido en ningún momento.

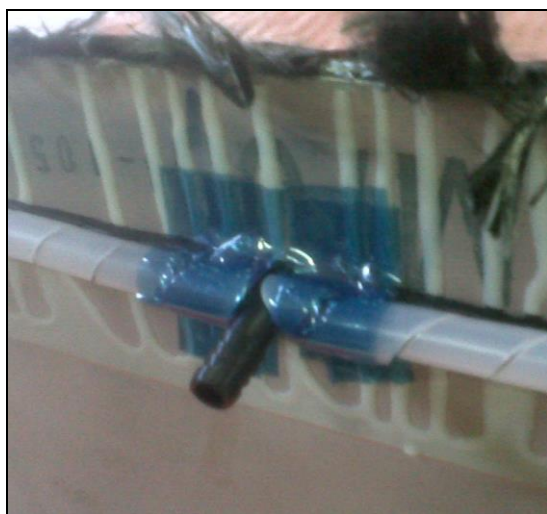


Imagen 8.20. Detalle de la 'T' colocada dentro del tubo de aspiración



Imagen 8.21. Detalle de la 'L' en una esquina del molde de unión entre dos tubos de aspiración

Los tubos se cubren con la malla de distribución para que la bolsa de vacío no obstruya el flujo de aire ni ésta pueda agujerearse.

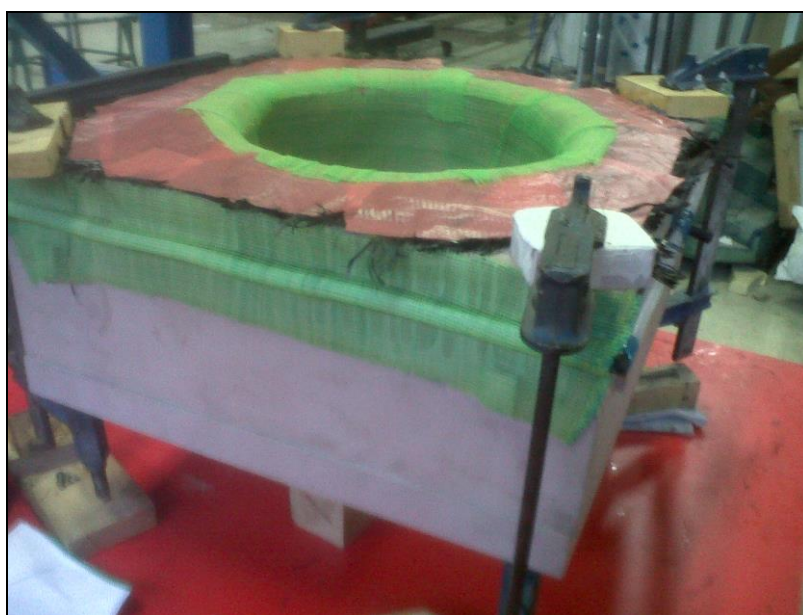


Imagen 8.22. Colocación de la malla de distribución encima del tubo de aspiración

El siguiente paso es conectar los tubos de aspiración con la fibra de carbono. Se coloca una tira de núcleo para infusión de entre 3 o 4 centímetros de ancho que conecta el tubo

con la fibra. Estas tiras se colocan, por un lado, por encima de la malla de distribución del tubo de aspiración, y por el otro lado se sitúa entre dos capas de fibra de carbono.



Imagen 8.23. Detalle de las tiras de núcleo para infusión

Los tubos de entrada de resina se colocan en el centro de la pieza. Pero este tubo se conecta con la pieza mediante la malla de distribución, no con el núcleo para infusión como se hace con los conductos de aspiración. Siempre que se hayan de conectar dos partes por donde haya de fluir resina se colocará malla de infusión y no núcleo para infusión. El núcleo de infusión únicamente sirve para que el aire pueda fluir con más facilidad desde la pieza hasta los conductos.

Hecho esto sólo hace falta colocar el molde dentro de la bolsa de vacío, sellarla con el *tacky tape* vigilando que los moldes no se separen, conectar el tubo de extracción a la trampa de vacío y hacer el vacío perimetral a la pieza.

Hay que tener cuidado al cortar la bolsa de no hacer cortos. Hay que tener en cuenta de que el molde por la parte inferior tiene una cavidad a la cual la bolsa se tendrá que adaptar. La bolsa no puede quedar tensionada ya que si la bolsa quedase de esta forma la fibra que se encuentra en esa zona no se adaptaría al molde y podría quedar con una geometría distinta a la que se quiere o podría haber concentraciones de resina mayor a la deseada. Por otra parte en las zonas con la bolsa tensionada es más propensa a sufrir pinchazos con lo que se perdería el vacío.

Al colocar la bolsa no importa si queda pliegues, de hecho es preferible que haya pliegues a zonas de tensiones. Por lo que se corta un trozo suficientemente grande para hacer el vacío en condiciones.

También se colocará un trozo de manta de absorción en las zonas del molde con superficies rugosas, aristas vivas y en la superficie de la mesa donde se apoyará el molde con el vacío hecho. Aunque la función principal de la manta de absorción no es este, el simple hecho de colocar manta de absorción en estas zonas evitará que la bolsa no pueda sufrir pinchazos. La función de la manta de absorción es la de absorber el exceso de resina que se produce al hacer el vacío.

Estos consejos sirven para hacer cualquier tipo de pieza a la que se le tenga que aplicar el vacío.

La trampa de vacío es un recipiente que se coloca entre la bomba de vacío y la pieza de infusión. Este recipiente sirve para asegurar que cualquier exceso de resina de la infusión no se vaya más allá de la línea de vacío y no entre en la bomba, evitando daños o la destrucción total de la bomba. Una trampa de vacío se puede construir fácilmente si no se dispone de ella. Esta trampa consta de un recipiente con un tubo que le entra, el que viene del molde, y un tubo que le sale, el que va a la bomba. Como dentro del recipiente se le hará el vacío se pueden sellar todas las juntas con un poco de *tacky tape*. También se puede colocar un vaso de plástico o papel dentro del recipiente donde se acumule la resina si ésta llegase a entrar. De esta manera será mucho más sencillo reutilizar la trampa en distintas ocasiones.



Imagen 8.24. Trampa de vacío fabricada por el equipo ETSEIB Motorsport

Se recuerda que la resina se introducirá por el centro.



Imagen 8.25. Detalle de la toma de entrada de resina en el molde

Mientras no se inyecta la resina se mantiene el tubo cerrado con una pinza o haciendo una 'Z' con el mismo tubo para impedir el flujo de aire.

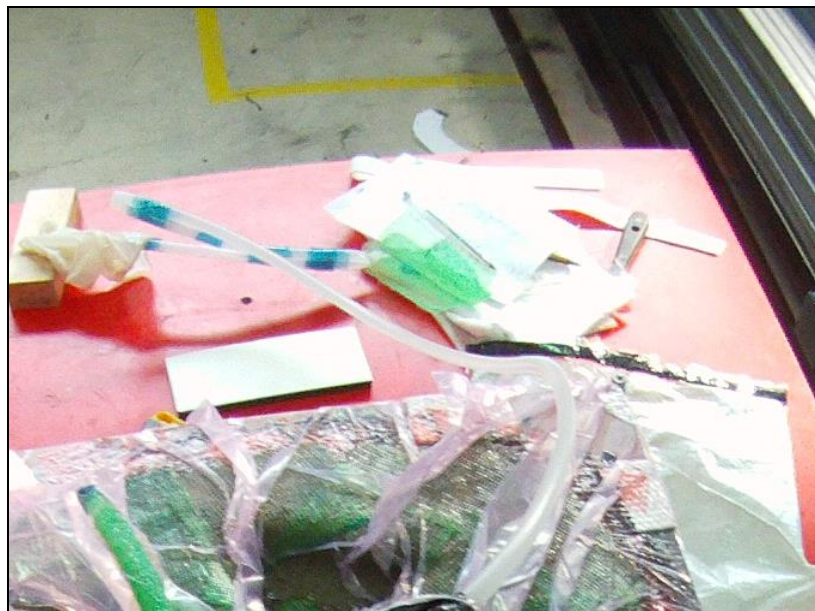


Imagen 8.26. Detalle del cierre del tubo de aspiración mediante una 'Z'

Se prepara la resina epoxy RESOLTECH 1800 con el *hardener* 1805. Se prepara aproximadamente entre 1,5 Kg y 2 Kg de resina con un porcentaje de *hardener* del 17%. Se mezcla bien la resina con el *hardener* hasta que quede un líquido homogéneo. Cuando está bien mezclado se le hace el vacío a la mezcla de resina y *hardener* para quitarle todo el aire que ha quedado al mezclar.

Cuando tenemos la mezcla a punto y el vacío está actuando sobre la pieza, se introduce el tubo de entrada dentro de la mezcla y se abre la conexión del tubo dejando que absorba la resina.

Es muy importante que mientras se absorbe la resina no quitar el tubo de la resina ya que entraría aire dentro del molde. Esto implicaría que quedase aire atrapado dentro del molde debilitándolo.

En apenas 3-4 minutos la resina ha impregnado toda la pieza y la infusión está terminada. Antes de retirar el tubo de la resina se volverá a cerrar la conexión del tubo mediante una 'Z' y se introducirá en el horno para que cure la pieza, donde se mantendrá durante 15h a 60°C.

Para que se pueda seguir haciendo el vacío durante el tiempo de curado dentro del horno, durante la etapa de preparación de toda la tubería se colocad una 'T' en el tubo que va del modelo a la bomba de vacío. A esta 'T' Se acopla un tobo con el final en otra bolsa en la que solo se pone manta de absorción y una toma de vacío. Por lo que cuando se desacople de la trampa de vacío se podrá mantener el vacío mediante esta toma. La función de la manta de absorción de esta bolsa es para evitar que la resina llegue a la bomba de vacío en caso de que por alguna razón fluyese resina hasta la bolsa.



Imagen 8.27. Detalle de la toma para poder mantener el vacío dentro del horno

Después de las 15h se retira del horno y se empieza el proceso de desmoldeo. Se retira la bolsa de vacío, los conductos de aspiración y de entrada de resina, la malla y por último retiramos el film sangrador.

Para finalizar con el desmoldeo se utiliza la ayuda de unas cuñas para separar el molde de fibra de carbono del modelo.

Para no sufrir ningún corte y poder manipular el molde con total seguridad se recortan y liján los bordes sobrantes donde se encuentran los extremos de los hilos de las capas de fibra que son como agujas.



Imagen 8.28. Detalle de la separación de la bolsa de vacío y el molde inferior después de la infusión



Imagen 8.29. Detalle del molde inferior después de ser separado del modelo

8.2.3. Laminación del segundo molde

Para la laminación del segundo molde o molde superior, se separa el modelo auxiliar del principal. Se vuelve a dar el mismo tratamiento desmoldeante que para la fabricación del primer molde a el modelo principal, central y al molde inferior. Se ensamblan estos tres modelos y se sigue el mismo procedimiento anterior. Se pueden ver más detalles de su fabricación en el anexo K.



Imagen 8.30. Laminado de la primera capa de fibra de carbono de gramaje 200 g/m²

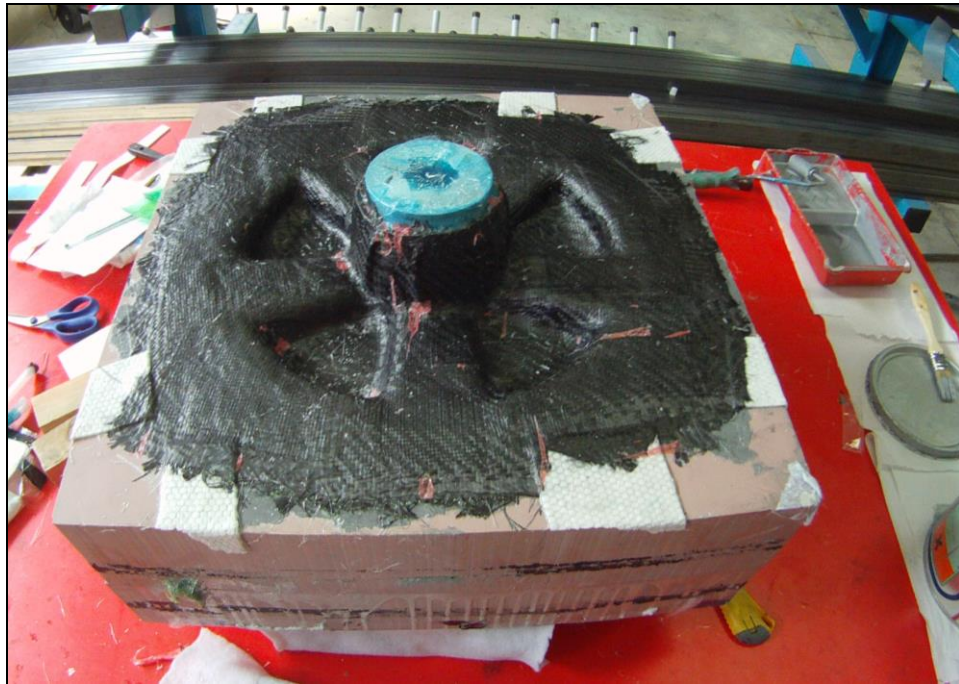


Imagen 8.31. Molde superior después de la extracción de la bolsa de vacío

Una vez se tienen los dos moldes separados se vuelven a poner al horno para hacer un poscurado de 15h a 90°C para que la resina adquiera sus máximas propiedades mecánicas. El ciclo de temperatura de curado es:

- 1- Se aumenta la temperatura hasta 90°C en las 6 primeras horas.
- 2- Se mantiene a 90°C durante 9 horas
- 3- Se deja enfriar hasta temperatura ambiente.

Para finalizar con el proceso de fabricación de los modelos se deben hacer los agujeros de centrado y los agujeros para los tornillos de sujeción. Estos agujeros se realizaran en la zona que hay entre los radios de la llanta. Se realizan 3 agujeros para el centrado y cinco para la sujeción. Para realizar los agujeros se vuelve a ensamblar los moldes en el modelo principal para asegurar el perfecto centrado de los moldes.

Los agujeros de centrado se necesita que no tengan ningún tipo de juego con los pasadores. Se requiere un ajuste por apriete mediano donde el ensamblaje se puede montar y desmontar y no hace falta que transmita esfuerzos, para ello ya se colocan los tornillos. Se dispone de pasadores cilíndricos DIN-6325 con una tolerancia m6. Por lo tanto

se desea un ajuste con apriete mediano y según la teoría se debe realizar un agujero con una tolerancia H7, que se puede realizar fácilmente con la ayuda de un escariador.

También se realizarán los agujeros para pasar los tornillos que aprieten los dos moldes y así evitar la separación de éstos cuando se les haga el vacío. Para los tornillos se realizan un agujero en cada hueco que hay entre los radios. Se colocan 5 tornillos de M6 con lo que simplemente se debe hacer el agujero utilizando una broca de diámetro 6,2mm..

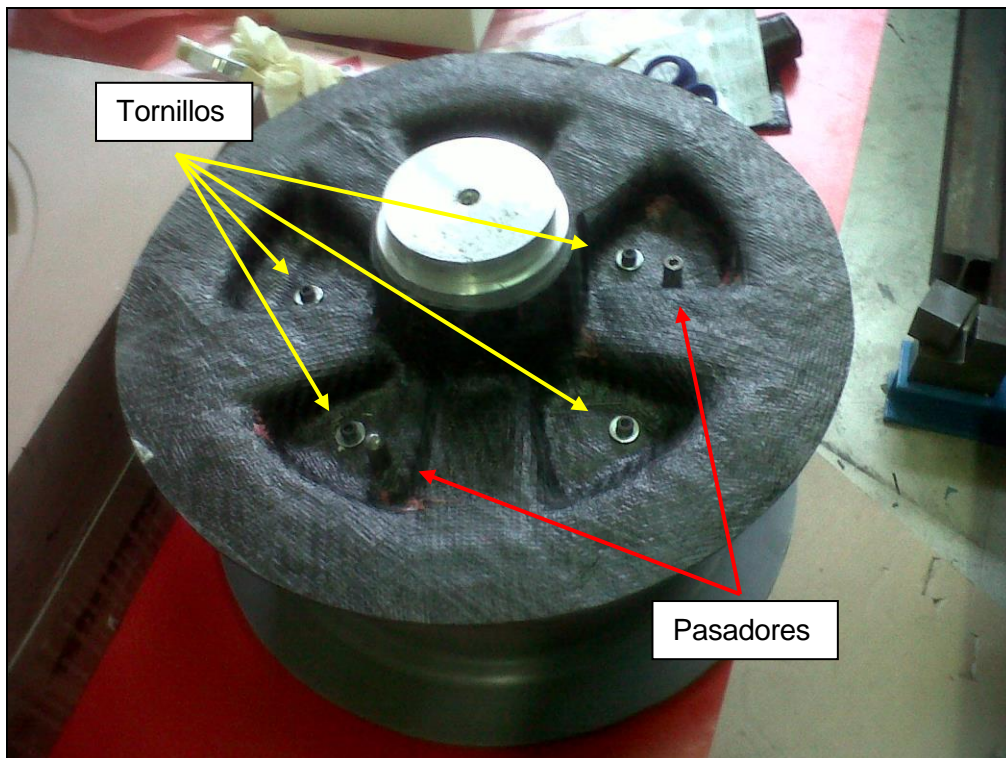


Imagen 8.32. Detalle de la colocación de los tornillos y pasadores de sujeción en los moldes

9. Laminación y curado de la pieza final

La pieza final se fabrica mediante fibra de carbono pre-impregnada o prepreg.

9.1. Preparación de los moldes

La preparación de los moldes es un poco distinta al de los modelos. Esto se debe primero a que el material de los moldes es distinto al de los modelos, y segundo a que el tipo de laminación también es distinto.

Primero se debe lijar la superficie de los moldes ligeramente para quitar toda la cera que haya quedado adherida en su fabricación.

El segundo paso es limpiar toda la superficie con abundante acetona para dejar la superficie sin ningún tipo de partícula.

El siguiente paso es la aplicación del tratamiento desmoldeante. Debido a la larga duración y a los largos ratos de espera entre las distintas aplicaciones de producto, se han diseñado unas fichas de seguimiento, de esta manera este proceso lo puede realizar personas distintas y llevar un control sobre la aplicación de los componentes desmoldeantes. Estas plantillas se pueden ver en el anexo L.

El primer producto que se aplica en el tratamiento es el MPP 712 EZ (se puede ver la ficha técnica en el anexo M). Este producto es una excelente base para la preparación y protección del molde. Tiene la capacidad para mejorar el rendimiento de los agentes desmoldeantes semipermanentes. El tratamiento del MPP 712 EZ consta de 6 aplicaciones con un tiempo de espera entre tratamientos de 30 minutos. Después de la última aplicación se debe esperar durante 2 horas para seguir el tratamiento desmoldeante. La aplicación se realiza frotando con la ayuda de un trapo de algodón. Se debe cambiar el trapo en cada aplicación para unos mejores resultados.

El siguiente paso es la aplicación del propio proceso desmoldeante. Para este proceso se utiliza dos productos, el Frekote B-15 y el Frekote 770-NC que son desmoldeantes semipermanentes. Estos productos tienen la particularidad que entre pieza y pieza no se debe volver a hacer todo el proceso desmoldeante, únicamente se debe dar una capa de recordatorio.

El Frekote B-15 es un sellador de desmoldeo. Con el tratamiento anterior del MPP 712 EZ únicamente se aplica 2 capas, con 15 minutos de espera entre las capas y 2 horas después de la segunda.

El Frekote 770-NC es el propio producto desmoldeante semipermanente. Es el último producto antes de empezar a laminar. De este producto se realizarán 6 capas con una espera de 15 minutos entre capas y de 2 horas en la última.

9.2. Procedimiento de laminado

El laminado se realizará sobre los dos moldes por separado. Por una parte se laminará el molde inferior con el molde central situado como si se tratara de un único molde y por el otro lado se laminará el molde superior. Una vez laminados los dos moldes se unirán solapando la fibra de carbono de un molde con el del otro molde con la ayuda de la bolsa de vacío.

El molde inferior y el molde central forman un único molde para ayudar a la laminación de la parte central que la cual está rellena completamente de fibra de carbono (monolítico de fibra de carbono) para soportar las fuerzas de apriete de la mono tuerca al buje. El hecho de que sean dos moldes por separado se debe a que los dos moldes deberán desmoldar en dos direcciones opuestas. Si no fuera así el molde nunca desmoldaría.

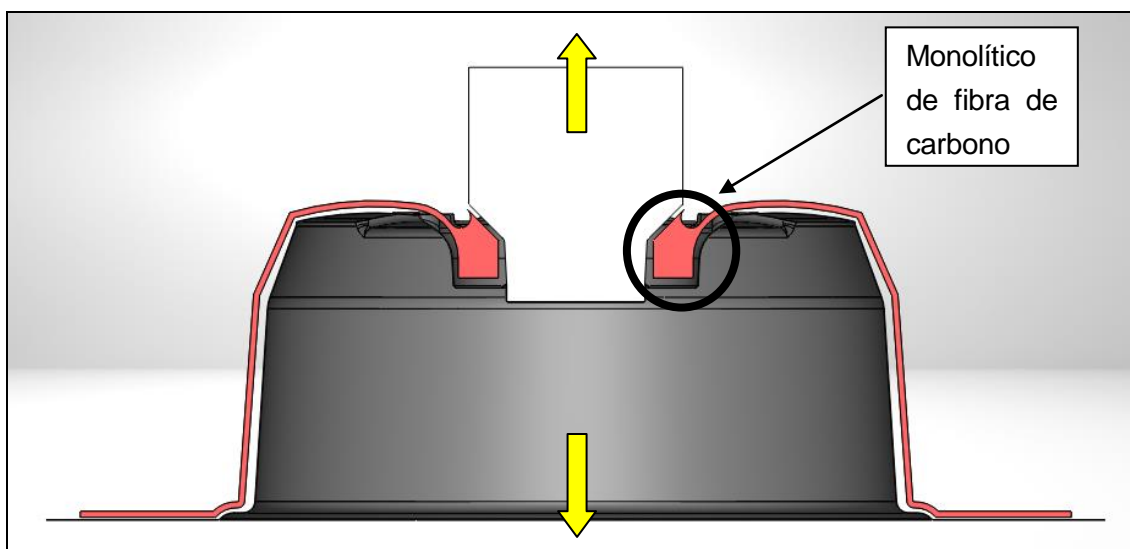


Imagen 9.1. Detalle del monolítico de fibra de carbono de la parte central

En el laminado de una pieza es importante tener en cuenta como serán los patrones de fibra de carbono y donde se situaran los solapes de las distintas capas. Para diseñar los patrones recortamos trozos de fibra con las inclinaciones que toca y se comprueba sobre el mismo molde que se adapten fácilmente, no es lo mismo un patrón con las fibra a 0 o 90 que a +45 o -45. Los patrones con las fibras a 45 se adaptan con más facilidad a las distintas curvaturas del molde.

Para el molde superior se hacen dos patrones distintos, uno para los radios y otro para la parte exterior.

Los patrones del molde inferior se realizaran de forma similar. Habrá un patrón para los radios, uno para la parte exterior. En el caso de la parte central se necesitará de distintos patrones. La primera capa se efectuará con tres patrones para adaptarse a toda la superficie. Por otro lado, para rellenar el monolítico de la parte central se utilizará otro patrón, que a medida que éste se vaya rellenando de fibra se tendrá que ir adaptando el patrón a su espacio.



Imagen 9.2. Detalle de los diferentes patrones del molde superior



Imagen 9.3. Detalle de los patrones del molde inferior y central

El laminado de la primera capa es el más importante por su carácter estético. Se ha de tener en cuenta la dirección de la trama para que los distintos patrones encajen y las líneas de la trama no se vean cortadas en los distintos patrones.

Teniendo en cuenta lo anterior, los solapes y el resultado de las simulaciones con los números de capas de cada zona, y pensando en el ahorro de fibra, se cortan los patrones de manera que se aprovecha al máximo la fibra de carbono.



Imagen 9.4. Distribución de los patrones correspondientes a diferentes capas

Para empezar a laminar lo primero que se hace es esparcir con un pincel una pequeña capa de resina epoxy por el molde. Luego se pone la primera capa de fibra con la ayuda de una espátula de nylon y un secador para proporcionarle calor a la resina del prepreg y éste se pueda adaptar mejor a la superficie del molde.



Imagen 9.5. Laminación con prepreg de la cara superior de la llanta en las instalaciones de NEXUS Projectes.

Con la primera capa laminada encima del molde se hace un primer vacío para compactar la capa al molde y que la fibra se adapte perfectamente a las aristas y curvas del molde. De esta manera se asegura que las siguientes capas se vayan adaptando perfectamente al molde. Después de la primera capa se hará un vacío de compactado cada 3 o 4 capas. Los compactados durarán entre 20 y 30 minutos.

Para hacer el vacío se pondrá el film sangrador que cubra bien toda la superficie de fibra de carbono y todo ello se cubrirá por encima con la manta de absorción para que la bolsa no se enganche a la fibra, ya que se podrían separar las capas de fibra al intentar desengancharla. Al film sangrador y a la manta se les puede añadir un poco de adhesivo en spray si fuera necesario para que no se moviera al colocar la bolsa.



Imagen 9.6. Colocación del film sangrador encima de la primera capa de la cara inferior de la llanta para hacer la primera compactación

El proceso es muy sencillo, se van colocando capas una tras otra hasta llegar al número de capas obtenidas en las simulaciones (10 capas) con las compactaciones comentadas. Se procura que los solapes entre capas no queden siempre en el mismo punto por tal de repartir el sobre grosor que podría quedar.

La bolsa de vacío y la mayor parte de la manta de las distintas compactaciones fue la misma. Se pudieron reaprovechar ya que al no curar la resina la bolsa y la manta queda en

perfectas condiciones. Únicamente hay que ir con cuidado al separarla del *tacky tape* que la bolsa no se dañara en exceso.

Con las capas ya puestas se preparan los solapes y la bolsa de vacío de los radios como en la imagen siguiente. Las bolsas de los radios se colocan de manera que entran por un radio y salen por el contiguo. Estas bolsas serán las encargadas de que la fibra de carbono del molde inferior se una con la fibra de carbono del molde superior.



Imagen 9.7. Colocación de la bolsa de vacío entre los radios de la cara inferior para poder juntar las dos cara de la llanta

El siguiente paso ya es juntar los dos moldes. Se tendrá especial cuidado en no pellizcar la fibra entre los dos moldes y que éstos hagan contacto entre ellos. Para finalizar la unión de los moldes se colocaran los centradores y se apretaran los tornillos de sujeción.

Llegados a este punto se colocará una capa de *peel play* para darle rugosidad a la fibra y poder laminar encima una vez haya curado para poder tapar los agujeros de los radios que quedarán.

Como último paso antes de hacer el vacío a la pieza se cubrirá toda la pieza con manta de absorción. En este caso la función de la manta será la de absorber el exceso de resina de la fibra de carbono.



Imagen 9.8. Ensamblaje de los moldes y colocación del peel play

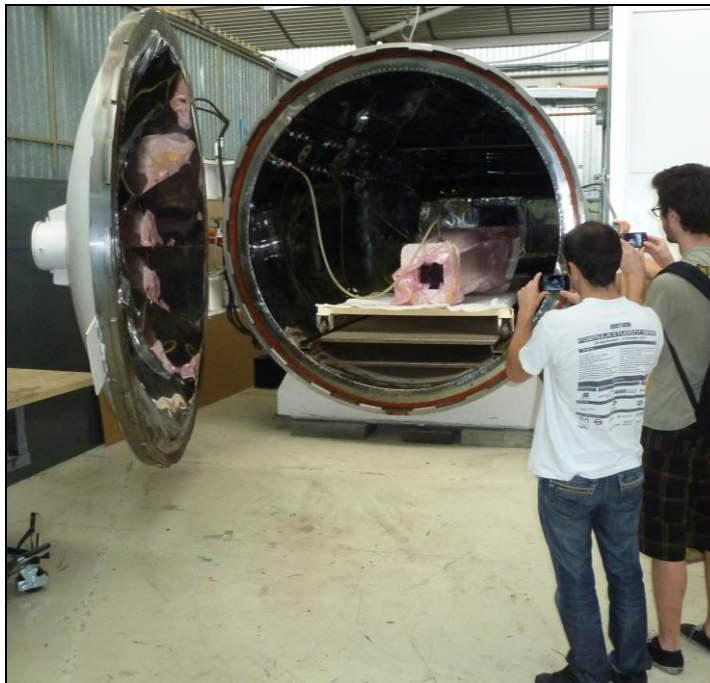


Imagen 9.9. Vacío completado sobre el molde antes de introducirlo en el horno autoclave

9.3. El curado

La característica principal de las fibras pre-impregnadas es que éstas se distribuyen ya con la resina impregnada en su cantidad justa y necesaria. Para poder manipular esta fibra la resina no se endurece hasta que no se le aplica un proceso de curado ya que el catalizador de la resina no se activa a temperatura ambiente. Por este motivo es necesario de un horno autoclave que permita hacer este proceso.

El horno autoclave permite hacer ciclos de curado a distintas temperaturas y distintas presiones. Puede trabajar con un rango de temperaturas de hasta 150°C y unas presiones de hasta 9 bares. Esto permite que la resina que se encontraba impregnada con la fibra se caliente y fluya a través de las fibras.



*Imagen 9.10. Autoclave en las instalaciones de NEXUS
Proyectos durante la extracción del
monocasco de fibra de carbono del CAT06e*

La aplicación de la presión es importante por un motivo fundamental, extraer las burbujas de aire de la resina que el propio vacío es incapaz de extraer.

Los ciclos de curado de las fibras pre-impregnadas dependen de la resina utilizada.

En nuestro caso se siguió el ciclo de curado que indica el fabricante de la fibra pre-impregnada en su ficha técnica (se puede ver la ficha técnica en el anexo M).

El ciclo de curado que se le aplica es el siguiente.

- 1- Se hace el vacío.
- 2- Se aplica 7 bares de presión.
- 3- Se reduce el vacío hasta un valor de seguridad.
- 4- Se aumenta la temperatura a una velocidad de $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$ hasta una temperatura de 120°C .
- 5- Se mantiene la temperatura a 120°C durante 60min
- 6- Se enfría a una velocidad de $2^{\circ}\text{C}/\text{min}$ hasta temperatura ambiente
- 7- Se reduce la presión cuando la temperatura baja de los 60°C .

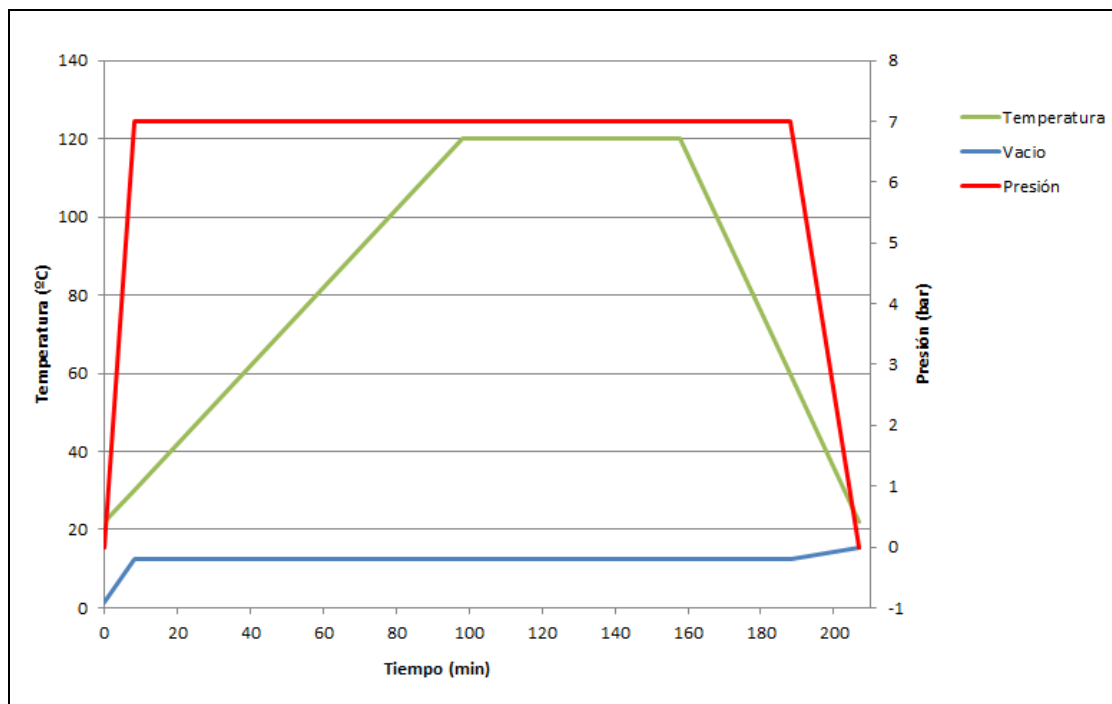


Fig. 9.1. Gráfico del ciclo de temperatura, presión y vacío durante el curado de la llanta en el horno autoclave

9.4. Acabados finales

El siguiente paso a la salida de la pieza final del horno autoclave es separarla de los moldes y quitarle la bolsa de vacío, la, manta de absorción y las capas de peel play y film sangrador. Para retirar la pieza de los moldes nos ayudamos de las cuñas.



Imagen 9.11. Lanta recién separada de los moldes

Como se puede observar en la Imagen 9.12 el peso de la llanta recién separada de los moldes es de 1,680 Kg, muy por debajo del peso de las llantas de aleación de aluminio del año anterior de 3,4 kg. Por lo tanto se ha conseguido el objetivo principal de reducir el peso de las llantas.

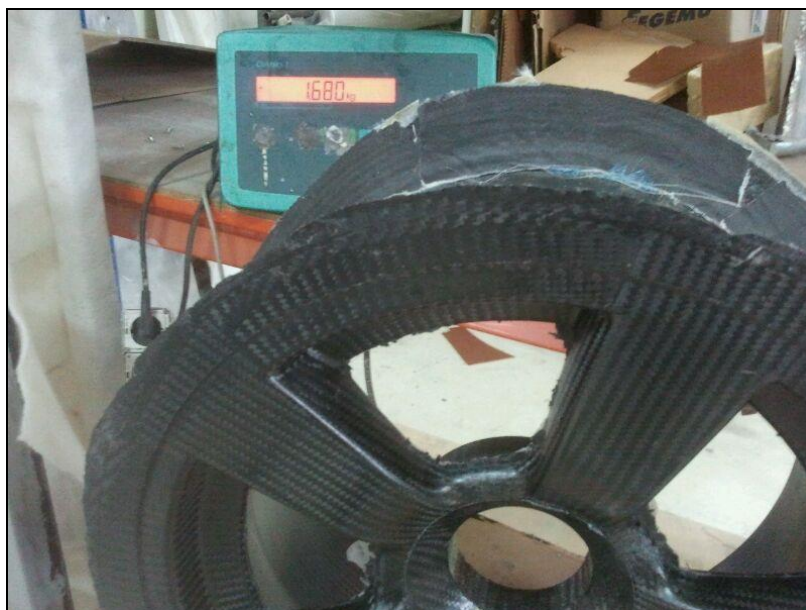


Imagen 9.12. Detalle del peso de la llanta (1680 kg) después

Para tener una llanta útil y funcional se le debe tapar los agujeros de los radios de tal manera que los flancos del neumático tengan un buen apoyo en esta zona de la llanta, mecanizar los agujeros de los centradores del buje y hacer el agujero de la válvula de hinchado.

El procedimiento para tapar los agujeros de los radios se detalla a continuación.

Como se ha comentado en el apartado de **7.1.3 Factibilidad de fabricación y diseño de moldes y modelos** el diseño está pensado para laminar a posteriori unos parches que tapen los agujeros.

Una vez más se seguirá el procedimiento habitual explicado en el apartado anterior de laminado de prepreg para laminar los parches. Estos se laminarán encima del molde superior.

Una vez desmoldeado los parches se recortan a la medida exacta del agujero. Se hacen a medida para cada agujero por separado.



Imagen 9.13. Detalle de la tapa de los agujeros de los radios

Una vez se comprueba que la medida es la adecuada se adhesiva a los laterales del agujero con el adhesivo A140 de la marca AXSON procurando que no quede ningún agujero. Se ha de sellar completamente. Para asegurar su posición y que no se pueda mover de su sitio se coloca una cinta adhesiva, que se retirará una vez el adhesivo haya curado.



Imagen 9.14. Detalle de los adhesivos de las tapas de los agujeros de los radios

El siguiente paso es lijar toda la zona del adhesivo hasta que quede una superficie lisa. Llegados a este punto se limpia completamente la superficie de la llanta con un trapo y acetona. Cuando quede bien limpio se laminan 2 capas de prepreg alrededor de toda la zona del agujero. Se lamina con unas tiras que rodeen toda la llanta.

Como última acción para poder calzar el neumático a la llanta es mecanizar la zona de los flancos hasta la medida exacta a la que se desea.

Los agujeros de la válvula de hinchado y los agujeros de posicionamiento en el buje se hicieron en el laboratorio común de la universidad. Plano 1 del anexo de planos.

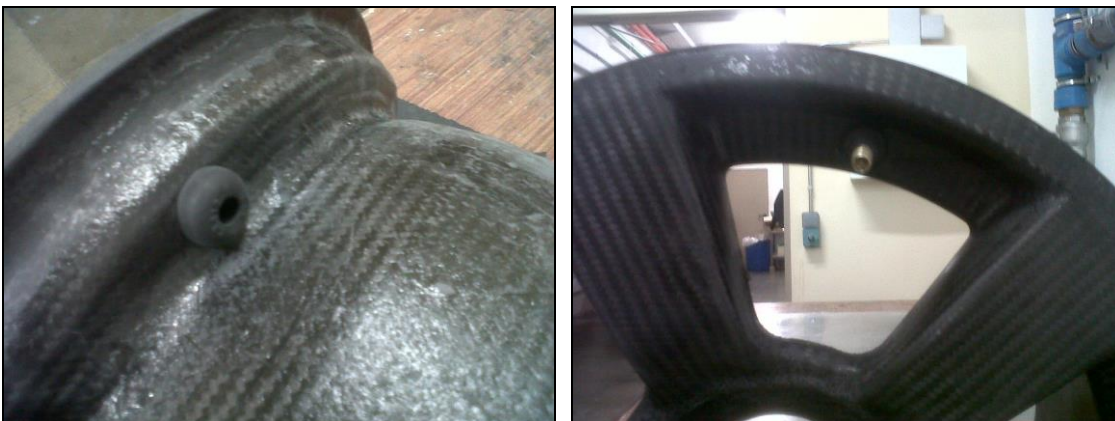


Imagen 9.15. Detalle de la válvula de hinchado colocada en la llanta

10. Estudio de impacto ambiental

10.1. Interacción con el medio ambiente

El principal peligro que puede causar la fabricación de la llanta es principalmente hacia la salud de los estudiantes. Es especialmente peligroso el proceso de laminación que implique la manipulación de la resina epoxi, como la laminación por vía húmeda o infusión, por culpa de los componentes químicos de la resina epoxy. Por el contrario, las fibras son prácticamente inertes para el ser humano.

Los principales efectos sobre la salud debidos a una sobreexposición a los productos químicos utilizados en los sistemas de resinas epoxy son las irritaciones en los ojos, nariz, cuello y piel, asma, así como alergias en la piel. Los productos donde la resina ya se ha endurecido son inertes, no tóxicos, siempre que no sean manipulados, cortados o pulidos.

Los componentes químicos de la resina epoxy pueden afectar la salud cuando entran en contacto con la piel, o si se evaporan o se pulverizan y son respirados. Algunos aditivos pueden causar dolor de cabeza, mareos y desorientación. A continuación se evalúa cómo afectan a los diferentes sistemas del cuerpo humano:

Pulmones: Los vapores y el polvo de la resina epoxy pueden irritar los pulmones. Hay personas que tienen asma debido a los agentes de curado, algunos síntomas son dificultades respiratorias, tos... estos síntomas suelen aparecer después de trabajar o durante la noche. Una vez la persona ha desarrollado una alergia hacia los agentes de curado incluso el polvo al lijar o limar una pieza puede provocar un ataque de asma. Por lo que es importante trabajar con máscaras protectoras.

Piel: Las resinas epoxy pueden causar los siguientes síntomas al entrar en contacto con la piel: irritación, inflamación y picores. Algunas personas desarrollan una alergia cutánea, quizás días después de entrar en contacto con la resina, o después de años de trabajar con ella. Es importante la utilización de guantes de látex para evitar el contacto de la resina con la piel.

Ojos, nariz y garganta: La mayoría de las resinas epoxy y sus vapores (especialmente los agentes de curados) pueden causar irritaciones en los ojos, nariz y garganta. Algunas personas tienen dolor de cabeza debido a esas irritaciones. Si los líquidos entran en contacto con el ojo, provocan una gran picazón y puede causar daños graves en el ojo. En

caso de contacto con el ojo, limpiar inmediatamente con agua durante unos 15 minutos y buscar rápidamente atención médica.

Sistema Nervioso: Los componentes inhalados o absorbidos por la piel pueden afectar al sistema nervioso de la misma forma que lo haría beber alcohol. Los síntomas debidos a las sobredosis son dolor de cabeza, mareos, náuseas, dificultades para hablar, confusión y pérdida de la conciencia.

10.2. Acciones de protección al laminar y a la manipulación del producto final:

- Los botes que contienen las resinas y los catalizadores, deben ser cerrados y protegidos con cuidado para evitar la evaporación de sus componentes químicos.
- El espacio de laminación y de mecanizado de las piezas finales deben tener un buen sistema de ventilación con extractores, para reducir la concentración de los componentes en el aire.
- Durante el curado, la resina se calienta provocando la evaporación de los productos químicos, a mayor temperatura mayor liberación, por tanto es recomendable utilizar la menor temperatura de curado posible.
- Equipo de protección: se recomienda la utilización de mascarillas, gafas protectoras, guantes y llevar un mono de trabajo.
- Higiene personal: Apenas al terminar de laminar es recomendable lavar la piel que haya entrado en contacto con el epoxy o con las fibras rotas al mecanizar el producto final.

Por otra parte, según NEXUX Projectes la vida útil de la llanta con la tecnología de laminación, mediante fibra pre-impregnada es de más de 10 años, por tanto, tiene una vida útil que cubre de sobra la esperanza de vida de cualquier componente de un vehículo de la FS construido por la ETSEIB Motorsport.

10.3. Sistema de reciclaje de materiales compuestos

Los vehículos se renuevan completamente casi cada año, y muchas veces los componentes son incompatibles entre los vehículos. En este aspecto la llanta tiene una vida útil sobradamente amplia para el mundo de la competición de la FS.

Debido a la poca cantidad de residuos generados por la fabricación de los moldes y de la llanta durante su fabricación, no se consideró necesario contratar a una empresa de reciclaje de los residuos ya que sólo se generaron aproximadamente unas tres bolsas de basura de residuos.

Los residuos se tiraron los contenedores de la empresa NEXUS Projectes donde se llevaron a cabo los procesos de laminación.

Aun así existen varios tipos de sistemas de reciclaje de los materiales compuestos.

PIRÓLISS EN VACÍO: Existen diferentes tipos de pirólisis en vacío, a diferentes temperaturas y en diferentes medios de operación.

La pirólisis en vacío típica, es un proceso en seco que opera en torno a los 500°C, y recupera las resinas en forma de líquido comercial. Se trata de un proceso que fácilmente se puede reproducir a gran escala (hasta múltiples toneladas de capacidad). Por otra parte, a estas temperaturas, las fibras pueden contener residuos de oxidación o carbonización.

La empresa Norteamericana ATI (Adherent Technologies Inc.) ha desarrollado un líquido de proceso que opera a 150°C y funciona a menos de 150 psi en equipos estándar y es capaz de producir fibra preparada para comercializar. Por otra parte, no tolera materiales como el metal, filamentos, pintura o aislantes. El otro proceso que se ha desarrollado es a 300°C y produce fibra limpia de la mayoría de materiales compuestos, pero requiere equipamiento especial y no se considera rentable.

PIRÓLISIS CON MICROONDAS: La pirólisis con microondas es otra forma para reciclar compuestos. En su desarrollo están participando varias empresas y universidades, tanto de los Estados Unidos, como de Inglaterra o Alemania. En general las microondas son absorbidas por las propiedades conductoras del carbono, consiguiendo que el calentamiento de la matriz de resina sea desde el interior y no exteriormente.

Lo que se consigue así es una descomposición más rápida de las resinas, y una recuperación de las fibras sin la carbonización de las fibras, con un tiempo mucho más reducido y unos equipos de tamaño mucho más reducido.

11. Presupuesto del proyecto

Como cualquier proyecto, la parte económica es una de las partes más importantes a tener en cuenta. El presupuesto del proyecto se ha dividido en 4 apartados: el coste del estudio técnico, el coste de los modelos, el coste del molde y el coste de la pieza final.

La mayoría de los precios han sido extraídos del mercado o del listado de precios estandarizados que propone la *FS Germany* para homogeneizar el documento del *Cost Report*. Los precios que aparecen en el listado que propone la *FS* es el precio unitario que tendría si se fabricara un total de 1000 unidades al año.

A continuación se puede observar un resumen de los presupuestos que se encuentran desglosados en el anexo D de fabricar una llanta.

Gastos	
Fabricación de los modelos	2.483,56 €
Mano de obra	1.360,00 €
Material	1.123,56 €
Fabricación de los dos moldes	1.724,17 €
Mano de obra	1.120,00 €
Material	604,17 €
Fabricación de la llanta	2.489,00 €
Mano de obra	1.440,00 €
Material	1.049,00 €
Estudio técnico	16.750,00 €
Asesoramiento NEXUS Projectes	2.350,00 €
Asesoramiento PROTO-TECH System	600,00 €
Total de material	2776,73 €
Total de mano de obra	3920,00 €
COSTE TOTAL DEL PROYECTO	26.396,73 €

Tabla 11.1 Coste total del proyecto

En este proyecto ha habido dos empresas como son PROTO-TECH System y NEXUS Projectes que han colaborado en la fabricación y el asesoramiento técnico, sin el cual no hubiese sido posible la fabricación de la llanta. El valor numérico que se detalla a continuación es el valor de la aportación de estas empresas en material, horas de fabricación y asesoramiento técnico.

Ingresos		
Patrocinio PROTO-TECH System		3.000,00 €
Aportación en material	1.100,00 €	
Mano de obra	1.300,00	
Asesoramiento técnico	600,00 €	
Patrocinio NEXUS Projectes		4.003,17 €
Aportación en material	1.653,17 €	
Asesoramiento técnico	2.350,00 €	
Total		7.003,17 €

Tabla 11.2 Ingresos del proyecto

El balance entre ingresos y gastos corresponderá entonces al coste de la llanta que le hubiese costado al equipo ETSEIB Motorsport si hubiese tenido que pagar o externalizar el proceso de fabricación.

Balance de gastos		
Gastos		-26.396,73 €
Material	-2.776,73 €	
Mano de obra	-3.920,00 €	
Asesoramiento técnico	-2.950,00 €	
Estudio técnico	-16.750,00 €	
Ingresos		+7.003,17 €
Material	+2.753,17 €	
Mano de obra	+1.300,00 €	
Asesoramiento Técnico	+2.950,00 €	
Total		-19.393,56 €

Tabla 11.3 Balance del proyecto

Como el estudio técnico, el torneado del molde central de aluminio y la laminación de los moldes y de la llanta final han sido realizados por miembros del equipo los costes del estudio técnico y de mano de obra tampoco se debe contabilizar en el balance total, ya que estos tampoco se pagan. Por lo que si al balance le restamos estos costes quedará exactamente lo que le ha costado el proyecto al equipo y en consecuencia a la universidad.

Cantidad de dinero gastada en el proyecto	
Balance de gastos	+19.393,56 €
Mano de obra realizada por miembros del equipo	-2.620,00 €
Estudio técnico	-16.750,00 €
Total	-23,56 €

Tabla 11.4 Precio de una llanta desglosado

Como se puede observar la cantidad de dinero gastada en el proyecto es de 23,56€ que corresponden a la compra del aluminio para la realización del molde central. El coste del aluminio se detalla en los presupuestos del material utilizado en el anexo D.

Por otra parte se hacen los cálculos si el proyecto se llevara a su comercialización, siguiendo la normativa de la FS con una fabricación de 1000 unidades de este producto.

Se hace este cálculo para ver el valor real que tendría una llanta en el mercado, ya que se ha de tener en cuenta que el coste de ingeniería, los costes de los moldes y modelos se ha de repartir entre el número de unidades fabricadas.

Para el cálculo del precio se considera que los moldes se pueden utilizar, como se ha comentado anteriormente, para la fabricación de 200 llantas, por lo tanto se necesita fabricar los moldes 5 veces y que para la fabricación de estos moldes únicamente se fabrica un modelo ya que se puede utilizar el mismo para cada ocasión.

Concepto	Precio unitario
Fabricación de los modelos	2,48 €
Fabricación de los dos moldes	3,02 €
Fabricación de la llanta	1.049,00 €
Coste de Ingeniería y mano de obra	22,26 €
Total	1.076,76 €

Tabla 11.5 Precio de una llanta desglosado

Únicamente existe una llanta fabricada íntegramente en fibra de carbono que se comercializa. Esta llanta es la CR9 Series de una empresa australiana que se llama *Carbon Revolution*. En el mercado americano tiene un precio de 3.737,50\$ (al cambio 2.762,72€) por lo que la llanta fabricada en el equipo tendría un precio muy inferior con un precio de 1.076,76€.

Conclusiones

Una vez acabado el proyecto y analizados los resultados obtenidos con la construcción de una llanta en fibra de carbono, se puede extraer que se ha consolidado una buena estructura y un buen traspaso de *know-how* referente a los materiales compuestos dentro del equipo ETSEIB Motorsport. La experiencia de años anteriores ha permitido abrir nuevas vías de investigación posibilitando la fabricación de piezas cada vez más complicadas y con solicitudes más elevadas con nuevos materiales. Esto permite que cada año se consiga ampliar el conocimiento anterior y sea transmitido a los equipos de los años siguientes donde la fabricación de piezas de fibra de carbono no tenga límites.

Por otro lado se ha conseguido consolidar y aumentar una red de empresas colaboradoras del sector de los composites con la universidad, permitiendo año tras año la posibilidad de una vía de desarrollo de componentes de materiales compuestos reforzados para la automoción.

Referente a los objetivos más concretos del proyecto, se ha diseñado y fabricado un prototipo de llanta de fibra de carbono que mejora las características y prestaciones de las llantas comerciales usadas anteriormente en los distintos monoplaças del equipo.

Tal y como ya se había intuido al inicio del proyecto, el retraso general del proyecto obligó a destinar todos los esfuerzos en la finalización del monoplaça y poder conseguir así los mejores resultados posibles en las distintas competiciones. De esta manera el equipo de este año, el CAT07e, ha cogido el relevo de continuar con el segundo objetivo que era la construcción de un juego de llantas.

La importancia de este proyecto reside en que se ha demostrado que es factible la fabricación de unas llantas en fibra de carbono con unas mejores prestaciones. Se ha conseguido fabricar un prototipo de una llanta con un peso inferior (1,700kg), reduciendo la masa de una llanta en un 60% respecto las llantas de aleación de aluminio del modelo "Superleggera" de la marca OZ Racing.

Este prototipo permitirá a los componentes del futuro equipo del CAT07e, durante la primera parte del proyecto, poder llevar a cabo las pruebas pertinentes, y seguir con el proyecto donde seguramente sí que podrán utilizar estas llantas en las competiciones en las que participen con unos resultados que indudablemente serán sorprendentes.

Referente a la elaboración de cualquier tipo de piezas de composites que el equipo tenga que laminar en el taller de la universidad, como carrocerías, asientos, etc... recomiendo a

los equipos de los años siguientes, que en la medida de lo posible, cambien la metodología de fabricación, hasta el momento por vía húmeda con la impregnación de la fibra mediante pinceles, por la infusión. La laminación por vía húmeda obliga a laminar una pieza de manera ininterrumpida, empezar y acabar el proceso de laminado en un determinado periodo de tiempo que viene determinado por el tiempo que tarda la resina en catalizar. El proceso de laminado por infusión no utiliza la resina hasta el último instante y por un periodo de tiempo muy reducido con lo que permite la laminación en diferentes etapas y compaginarlo con posibles clases u horarios de la universidad. De este modo este proceso de laminación de piezas permite un ambiente de trabajo más relajado durante su desarrollo y a más a más es un proceso con el que se puede conseguir unas condiciones de limpieza superiores al proceso de laminación por vía húmeda.

Agradecimientos

Quiero agradecer principalmente a mis padres Isabel y Javier, y mis hermanos Óscar y Mónica, por el soporte que me han dado durante los tres años que he estado en el equipo y apoyarme en las épocas de más trabajo. Y por adaptarse a los duros y largos horarios de trabajo sobre todo en fines de semanas y vacaciones.

Me gustaría agradecer también a todos y cada uno de mis compañeros del CAT04 por darme a conocer y transmitirme esta gran pasión que es la *Formula Student*. Por haber hecho de ese equipo un grupo de personas con el que seguimos en un contacto permanente después de 3 años de haber finalizado el proyecto. Sobre todo a Francesc Volart y Josep Oriol Basomba por hacer posible emprender nuevos proyectos juntos donde seguir aprendiendo sobre composites.

También agradecer a los miembros del CAT05e por hacer realidad el primer monoplaza de Formula Student eléctrico de la universidad. En especial a mis compañeros de sección a Gerard Mosquera y Alberto Hernandez por apoyarme en emprender este proyecto y por su ayuda en algunas partes del proyecto.

A los compañeros del CAT06e que me han ayudado en el desarrollo del proyecto. A, Sergi Rexach, John Parent, Álex García y especialmente a Sergio Crespo, Carlos Garrido, Francisco Rangel y Roger Torm por las horas invertidas en ayudarme en el proceso de fabricación de los moldes y de la llanta.

A Tània de los Santos, Rafael Boronat, Emili Hernández, Francesc Roure y en general a toda la ETSEIB por esta gran oportunidad, la de diseñar y construir un monoplaza con motor de combustión y los primeros dos eléctricos.

Y para finalizar a todos los patrocinadores que año tras año apoyan al equipo. En concreto agradecerles a los dos patrocinadores principales de este proyecto a NEXUS Projectes, por enseñarme todo lo que se hoy por hoy sobre composites, y PROTO-TECH System ya que sin ellos este proyecto no hubiese sido posible.

Bibliografía

Referencias bibliográficas

- [1] FORMULA STUDENT GERMANY. *FSC, Formula Student Combustion*. 2013.
- [2] FSAE, Formula Society of Automotive Engineerings. *FSAE Rules*. 2013.
- [3] TRZESNIEWSKI, M. *Rennwagentchnik Grundlagen, Konstruktion, Komponenten, Systeme*. Republica Checa, GWV Fachverlage GmbH, 2008.
- [4] RAO, SINGIRESU S. *Vibraciones mecánicas*. Méjico, Pearson Educación, 2012.
- [5] BASEDNJAK DIETRICH, A. *Materiales compuestos: Procesos de fabricación de embarcaciones*. Barcelona: Edicions UPC, 2005.
- [6] CHUNG, DEBORAH D. L. *Carbon Fiber Composites*. Butterworth-Heinemann, 1994.
- [7] CHAPMAN, MATTHEW K. *Development of a Composite Wheel Rim for an FSAE Car*. Canberra, Academy Racing, 2009.
- [8] *HexPly Prepreg Technology*. Hexcel Corporation. 2013
- [9] *Ever Barbero, J. Introduction to Composite Materials Design*. Florida, CRC Press, 2011.

Bibliografía complementaria

NEXUS PROJECTES [<http://www.nexusprojectes.com/>, 13 de septiembre de 2012]

MILLIKEN, W.F., MILLIKEN, D.L. *Race car vehicle dynamics*. Warrendale: SAE International Publications, 1995.

Vibrational Analysis of Quarter Car Vehicle Dynamic System Subjected to Harmonic Excitation by Road Surface Undergraduate Academic Research Journal (UARJ), Volume-1, 2012

WHEEL WAREHOUSE ONLINE (Tienda online de llantas)

[\[http://www.wheelwarehouseonline.com/wheel/wheel-brand-carbon-revolution/wheel-model-cr9-series/diameter-all/finish-carbon-fiber/price-all\]](http://www.wheelwarehouseonline.com/wheel/wheel-brand-carbon-revolution/wheel-model-cr9-series/diameter-all/finish-carbon-fiber/price-all), 15 de noviembre de 2013]

HOOSIER RACING TIRE [\[http://www.hoosiertire.com/fsaeinfo.htm\]](http://www.hoosiertire.com/fsaeinfo.htm), 4 de octubre de 2012]

BRAID WHEELS [\[http://www.braid.es\]](http://www.braid.es), 18 de septiembre de 2012]

OZ RACING [\[http://www.ozracing.com\]](http://www.ozracing.com), 3 de diciembre de 2012]

ROSE-HULMAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY (Uso de Simulink en sistemas de 2DOF)

[\[http://www.rose-hulman.edu/~cornwell/courses/em406/em406_lectures/lecture%2019%20%20two%20DOF%20systems%20forced.pdf\]](http://www.rose-hulman.edu/~cornwell/courses/em406/em406_lectures/lecture%2019%20%20two%20DOF%20systems%20forced.pdf), 20 de febrero de 2013]

VIDEO MANUAL DE ABAQUS SIMULIA 3DS (simulación de composites)

[\[http://www.simulia.com/services/training/V67-Introduction-DEMO/movies/compositeLayup.html\]](http://www.simulia.com/services/training/V67-Introduction-DEMO/movies/compositeLayup.html), 10 de diciembre de 2012]